



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HEIDI TUORILA
OPTISEN PUOLIOHDEVAHVISTIMEN KEHITTÄMINEN
HYBRIDI-INTEGROINTIA VARTEN

Diplomityö

Tarkastaja: Associate Prof. Tapio Niemi
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden tiedekunnan
tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 9.3.2016

TIIVISTELMÄ

HEIDI TUORILA: Optisen puolijohdevahvistimen kehittäminen
hybridi-integrointia varten

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 76 sivua, 4 liitesivua

Elokuu 2016

Teknis-luonnontieteellinen koulutusohjelma

Pääaine: Teknillinen fysiikka

Tarkastajat: Associate Prof. Tapio Niemi

Avainsanat: SOA, hybridi-integraatio, katkaisumerkit, Euler-mutka, GaAs, mutkahäviöt, märkäsyövytys

Tämän työn tarkoituksena oli kehittää galliumarsenidi pohjaisten optisten puolijohdevahvistimien (SOA) hybridi-integraatiota pii-eriste-alustalle (SOI). Integraation kehittämiseksi käytettiin kahta lähestymistapaa: SOA-sirun pituuden tarkka säätely ja valon kytkennän helpottaminen tuomalla SOA:n aaltojohdekanavan valon sisään- ja ulostulopäät sirun samalle reunalle taivuttamalla kanava U-mutkalle. Jälkimmäinen ratkaisu kohdistamisen helpottamiseksi mahdollistaa lisäksi sirun tiiviimmän pakkauksen. Sirujen pituuden säätelyn parantamiseksi kehitettiin puolijohteeseen valmistusprosessin aikana syövytettävät katkaisumerkit, joiden avulla sirujen pituus on riippuvainen lähinnä merkin muodon vaikutuksesta kidetasojen mukaiseen pilkkoutumiseen. U-mutkien kehityksessä käytettiin Euler-spiraalimuotoa mutkahäviöiden vähentämiseksi.

Lopputuloksena tässä työssä raportoidaan katkaisumerkkien avulla saavutettavan komponentin pituusvaihtelun pienentyminen perinteisen pilkkomismenetelmän useasta mikrometristä ± 250 nm:iin. Jatkokehitystä vaativana ongelmana on katkaisumerkkien tuottaman pilkkoutumisen laadun vaihtelu, joka pienentää saantoa. Alustavien testien perusteella ongelmaan vaikuttaisi kuitenkin olevan olemassa mahdollinen ratkaisu. Euler-SOA sirujen kehityksestä raportoidaan ensimmäisten laserdiodeina toimivien sirujen onnistuminen. Sirujen mutkahäviöille tehdyn arvion perusteella mutkan minimikäätösäteen ei havaittu vaikuttavan mutkahäviöiden suuruuteen. Parhaimmalla näytteellä häviöiden arvioidaan jäävän välille 0,5-3 1/cm. Seuraavissa testeissä tullaan testaamaan sirujen operoimista SOA:na. Tämän seurauksena varmennetaan valon kulku mutkan lävitse ja syntyvien mutkahäviöiden suuruus.

ABSTRACT

HEIDI TUORILA: The Development of Hybrid Integrability of a Semiconductor Optical Amplifier

Tampere University of Technology

Master's thesis, 76 pages, 4 Appendix pages

August 2016

Master's Degree Programme in Science and Engineering

Major: Technical Physics

Examiner: Associate Prof. Tapio Niemi

Keywords: SOA, hybrid-integration, cleave marks, Euler bend, GaAs, bend losses, wet etching

In this thesis the objective was to develop the hybrid-integration of semiconductor optical amplifiers (SOA) to the silicon-on-insulator platform. For the development of the integration two methods were chosen: to increase the precision of the device length control and to facilitate better coupling of the light signal by bringing the waveguide's input and output channels on the same side of the device by bending the waveguide into a U-shape. The latter method also improves the tighter packaging of the device in addition to the ease of alignment. For the development of the length control of the SOA, cleave marks, etched into the semiconductor during the manufacturing process, were developed. With these marks the length of the device is mostly dependent of the effect of the mark shape affecting the cleaving along the crystal plane. For the development of the U-bends, the Euler spiral shape was used to decrease the bend losses.

As a final result in this thesis, it's reported that the devices' length variation was decreased from the several micrometers of the traditional cleaving method's to ± 250 nm. The variation of the quality of the cleaved surfaces, that decreases the yield, requires further development. However, the initial tests suggest a possible solution to the problem. From the development of the Euler-SOA devices, the manufacturing of the first devices operational as laser diodes is reported. The estimate for the bend losses of the devices shows the bend losses to be constant as a function of the bend minimum radius. For the best sample the bend losses were estimated to remain in the range of 0.5-3 1/cm. In the following tests the operation of the devices as SOA will be tested and subsequently the propagation of the light through the bend and the magnitude of the bend losses will be ascertained.

ALKUSANAT

Tässä työssä esiteltyt tulokset on tehty osana EU-projekti RAPIDO:a, jossa Optoelektroniikan tutkimuskeskus (ORC) TTY:ltä on mukana. Työssä tehdyn kehitystyön ja joidenkin mittausten osalta yhteistyötä on tehty RAPIDO:ssa mukana olevan VTT:n tutkimusryhmän kanssa. Kiitos VTT:lle yhteistyöstä ja erityisesti Mikko Harjanteelle pyydettyjen julkaisujen lähettämisestä.

ORC:n osuudesta projektissa on vastuussa on professori Mircea Guina. Kiitos hänelle annetusta opastuksesta. Paljon kiitoksia työn tarkastajalle, Associate Prof. Tapio Niemelle. Työn ohjaajana ja projektissa työssä kehittävien komponenttien kehityksestä vastaavana toimivalle TkT Jukka Viheriälle iso kiitos työn ohjauksesta, neuvoista, ideoista ja suunnan näyttämisestä.

Prosessointitiimissä kehitystyössä ovat mukana olleet näytteitä prosessoimassa laborantit Mariia Bister ja Maija Karjalainen ja laboratorioinsinööri Mervi Koskinen. Fotolitografia maskien suunnittelussa, sirujen mittauksissa ja teoreettisessa pohdinnassa apuna oli Antti Aho. Koko prosessointitiimille myös iso kiitos kaikesta avusta ja tuesta.

ORC:llä projektissa on mukana on prosessointiryhmän lisäksi laimeita tyyppiyhdisteitä kehittävä MBE-kasvatustiimi. Kiitoksia Ville-Markus Korpijärvelle ja Riku Isoaholle työssä käytettyjen epitaksiaalirakenteiden kasvattamisesta.

Lisäksi haluan kiittää myös huonetovereita Sanna Rantaa, Iiro Leinoa ja Tero Isoaloa työhuoneelta luomisentuskan ymmärtämisestä ja kärsivällisistä vastauksista loputtomiin kysymyksiin. Lopuksi yleinen kiitos koko ORC:n yhteisölle ja kaikille niille ihmisille (ja Semipubille), jotka monin pienin ja isoin teoin ovat olleet osallisena työn edistymisessä.

Kirjoittajan oma osuus kehitystyössä on koskenut komponenttien käytännön kehitystyötä ja prosessointi puhdastilassa. Tähän kuuluu suurin osa erityisesti alkuvaiheiden prosessoinnista ja osa myös viimeisimmistä versioista. Lisäksi valtaosa mittauksista ovat itsetehtyjä ja mittaustulosten analyysi kokonaisuudessaan. Kontribuutiona ovat myös osa työn aikana syntyneistä kehitysideoista. Tutkimusidea itsessään on lähtöisin projektilta.

Tampere, 19.7.2016

Heidi Tuorila

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Puolijohdelaserdiodit ja optiset puolijohdevahvistimet	3
2.1 Puolijohdelaserdiodit	3
2.1.1 Vahvistavat puolijohdemateriaalit ja pin-liitos	3
2.1.2 Reunaemittoivan laserdiodin rakenne	6
2.1.3 Optinen kenttä ja aaltojohteet	11
2.2 Optiset puolijohdevahvistimet (SOA)	13
3. Katkaisumerkit RWG-SOA -komponentissa	16
3.1 Kiderakenteet ja märkäsyövytys	17
3.2 Mekaaninen tarkastelu	19
3.3 Kemiallinen tarkastelu: Märkäsyövytys	20
4. Optinen puolijohdevahvistin Eulerin käyrän muotoisella aaltojohteella . . .	23
4.1 Euler-spiraali ja mutkan rakenne SOA-komponenteissa	24
4.2 Mutkahäviöt	27
4.2.1 Häviötyypit	27
4.2.2 Mutkahäviöiden laskennallinen tarkastelu	29
5. Komponenttien kehitystyö	33
5.1 Katkaisumerkkien kehitys	33
5.1.1 Kuivasyövytystestit	33
5.1.2 Märkäsyövytystesti	35
5.1.3 Pilkkominen	38
5.2 Prosessivaiheet	40
5.2.1 Harjanteet	40
5.2.2 Katkaisumerkit	42
5.2.3 Avaus piidioksidiin	43

5.2.4	p-kontaktimetalli	43
5.2.5	Puolijohteen ohennus ja n-kontaktimetalli	44
5.2.6	Pilkkominen ja liittäminen mittausalustoihin	45
5.3	Euler-mutkien kehitys	45
5.3.1	Alustavat testit mutkien syövyttämiseksi	46
5.3.2	Komponenttien kehitystyö	48
5.4	Prosessivaiheet Euler-SOA -komponenteissa	56
6.	Tulokset ja niiden tarkastelu	59
6.1	Katkaisumerkki-SOA -sirut	59
6.2	Euler-SOA -sirut	63
7.	Yhteenveto ja päätelmät	70
	Lähteet	73
	LIITE 1. Prosessivaiheet	77
	LIITE 2. Tulostaulukot	79

KUVALUETTELO

- 2.1 (a) Periaatepiirustus energiatasoista kaksoiskvanttikaivorakenteessa. Energia-aukko on pienimmillään kvanttikaivojen kohdalla. Tuomalla kvanttikaivoille elektroneja (ja aukkoja) saadaan aikaan elektroniaukkoparien stimuloitu emissio fotonin katalysoimana. (b) Hahmotelma optisen kentän jakautumisesta materiaalissa suhteessa epitaksiaalirakenteeseen. (c) Epitaksiaalirakenne, johon punaisella on merkitty kvanttikaivot, joiden alueella rekombinaatio tapahtuu. Merkinnot p ja n osoittavat materiaalin seostuksen. i -tarkoittaa intrinsiittistä eli seostamatonta aluetta. Kuvaan on myös merkitty työssä käytettyjen epitaksiaalimateriaalien koostumus. 5
- 2.2 Periaatepiirros laserdiodin PI -käyrästä. Kynnysvirtaa I_{th} alhaisemilla virroilla diodi toimii LED:nä. Kynnysvirralla vahvistuksen ja häviöiden määrät ovat yhtä suuret, jolloin diodi alkaa laseroimaan. Käyrän kulmakerroin $\eta_s = dP_0/dI$ kertoo laserdiodin hyötysuhteesta. 6
- 2.3 (a) Havainnekuva Fabry-Perot -kaviteetista. Vahvistavaa materiaalia (vahvistus g) ympäröivät peilit (heijastuvuus R), jotka puolijohteiden tapauksessa muodostuvat ilman ja puolijohteen rajapinnasta. Valo resonoi kaviteetissa ja vahvistuu joka kierroksella. Samalla osa valosta karkaa kaviteetista. (b) Fabry-Perot -kaviteetti vahvistaa ainoastaan niitä aallonpituuksia, joille pätee $L = m\lambda/2n_{eff}$, missä m on luonnollinen luku ja n_{eff} efektiivinen taitekerroin. Nämä aallonpituudet resonovat kaviteetissa muodostaen seisovan aallon. 7
- 2.4 Virransyöttö (merkitty vihreällä) laserdiodisiruun harjanteen kautta sinisellä merkityssä eristeessä olevan avauksen kautta. Keltainen alue sirun alla ja päällä kuvaa kontaktimetallia. Punaisella kuvaan on merkitty hahmotelma harjanteen rajaamasta optisesta kentästä ja sen leviämisestä kaukokentäksi. Kaukokentän muoto x - ja y -akselien suunnassa on gaussinen. 10

- 2.5 Vahvistus SOA-komponentissa. TW SOA:ssa päädyissä ei ole merkittävää heijastusta vaan valo kulkee L pituisen komponentin lävitse vain kerran. Sisään tuleva signaali $P(0)$ vahvistuu stimuloidun emission vaikutuksesta kun materiaalia pumpataan sähkövirralla. Toisessa päässä saadaan ulos vahvistunut signaali $P(L)$ 14
- 2.6 Periaatepiirros SOA-sirusta, jossa RWG on kallistettu 7° kulmaan fasetin normaaliin nähden. 14
- 3.1 (a) Luonnos kallistetusta SOA-sirusta katkaisumerkkien kanssa. Merkit sijoittuvat tasavälein sirun fasetille jättäen tilaa harjanteelle ja altaalle. Kallistuskulma on 7° fasetin normaaliin nähden. (b) Malli sirusta. Sirun mittasuhteet vastaavat testeissä käytettyjen sirujen mittasuhteita. Kuvan mallissa sirun leveys on $300\mu m$, pituus $800\mu m$, paksuus $110\mu m$ ja katkaisumerkkien periodi $100\mu m$ 17
- 3.2 Galliumarsenidin sinkkivälkekiderakenne. Galliumatomeita on merkitty kuvassa sinisillä ja arseeniatomeita vihreillä palloilla. Pallojen koot ja keskinäiset etäisyydet eivät vastaa todellisuutta. 18
- 3.3 Kuvissa on havainnollistettu malleilla katkaisumerkkien rakenne ja sijainti RWG:hen nähden. Mittasuhteet kuvissa vastaavat todellisia mittasuhteita. 21
- 4.1 (a) Periaatepiirros Euler-sirusta, jossa RWG on taivutettu U-mutkalle. Sinisellä kuvaan on merkitty mutka-alue, jossa allas on syövytetty koko epitaksiaalikerroksesta lävitse noin $3,5\text{--}4\mu m$ syvyyteen. Suoralla osuudella altaan syvyys on noin $1,1\mu m$ siten, että kvanttikaivoa ympäröivä aaltojohde jää ehjäksi. (b) Tietokoneella mallinnettu Euler-siru U:n muotoisella RWG:llä. Siru on piirretty oikeaa komponenttia vastaavissa mittasuhteissa, joskin tarkat mitat saattavat poiketa todellisista. Kuvassa mallin pituus on $2000\mu m$, leveys $600\mu m$, paksuus $110\mu m$ ja altaan leveys $26\mu m$. Mutkan minimisäde on $64\mu m$ 24
- 4.2 Euler-mutkan muodostuminen Cornu-spiraalin avulla. 25

4.3	Kuvissa on tietokonemallin avulla esitelty Euler-SOA -komponentin RWG-alueen rakenne. Mittasuhteet kuvissa ovat vastaavia kuin todellisissa siruissa.	26
4.4	Yksinkertaistettu havainnollistus sädemallin avulla valon sironnasta epätasaisella pinnalla. Pinnan epätasaisuus aiheuttaa sirontahäviöitä valon heijastuessa aaltorintaman kulkusuunnasta poikkeaviin suuntiin.	27
4.5	Havainnollistus aaltojohteen kaartumisen tuottamista häviöistä. Häviöt syntyvät, kun etenevästä muodosta kytkeytyy energiaa säteilymuotoihin etäisyyden kasvaessa liian suureksi mutkan keskipisteestä, jotta muoto pystyisi säilyttämään muotoaan. Muodon säilyttäminen vaatisi valon kulkevan ylitse nopeudella $v_c = c/n_2$, mikä on mahdottomasta.	29
4.6	Optisen kentän ohjaamiseksi mutkan lävitse harjannetta ympäröivä allas on syövytetty aktiivialueen lävitse. Tämä aiheuttaa askelman suorien osuuksien ja mutkan välillä johtaen mahdollisiin kytkentähäviöihin.	30
4.7	Havainnollistus Euler-SOA:n RWG:n jakautumisesta alueisiin, joilla häviöiden ja vahvistuksen arvot vaihtelevat.	31
5.1	Ensimmäinen katkaisumerkkitesti. SEM-kuvia katkaisumerkeistä puhtaalle GaAs pinnalle ICP-syövytettynä.	34
5.2	Urien poikkileikkaukset kohtisuoraan pilkkoutumispinnan kanssa. (a) Uran syvyys $32,8\mu\text{m}$ (b) Uran syvyys $25,3\mu\text{m}$. Uran muodossa havaittavissa lievää pyöreyttä. (c) Uran syvyys $15,6\mu\text{m}$ (d) Uran syvyys $9,0\mu\text{m}$. Syövytysaika on ollut riittämätön ja profiili ei ole täysin terävä. (e) Merkit skaalattu karkeasti toisiinsa nähden oikeisiin mittasuhteisiin. Urien syvyydet on merkitty kuvaan.	36
5.3	Katkaisumerkkien väliin jäävä kannas. Merkkien reunoilla nähdään epitaksiaalikerroksen vaihtelevan syöpymysnopeuden aiheuttama reunan epätasaisuus. Epitaksiaalikerroksen läsnäolo estää merkin reunojen teroittumisen johtaen merkin ovaaliin muotoon kiekkoa ylhäältä käsin tarkasteltaessa.	37

5.4	Fasetteja näytteissä, jotka on pilkottu katkaisumerkkien avulla. Siirrolinjat ovat selvästi näkyvissä sekä SEM- että mikroskooppikuvissa.	39
5.5	Katkaisumerkki SOA-komponenttien prosessivaiheet tiivistetysti. (a) Harjanteiden valotus. (b) SiO ₂ -maskin syövytys RIE:ssä. (c) Harjanteiden syövytys GaAs:iin ICP:ssä. (d) Katkaisumerkkien valotus. (e) Katkaisumerkkien kuiva- ja märkäsyövytys. (f) Avausten valottaminen piinitridiin. (g) Avausten syövytys piinitridiin RIE:ssä. (h) p-metallin kuvion valotus. (i) p-metallin höyrystys. (j) Lift-off, ylimääräisen metallin poistaminen. (k) Näytteen ohennus ja n-metallin höyrystys.	41
5.6	SEM-kuvia puolijohteen pinnasta: (a) ja (b)-kohdissa SiO ₂ -maskin kanssa, (c) ja (d)-kohdissa SiO ₂ poiston jälkeen. SiO ₂ :n poistamiseen käytetty 5 minuutin BHF-liotusta.	47
5.7	Esimerkkejä piinitridin kasvatuksen jälkeen havaittavasta kontaminaatiosta mikroskooppi- ja SEM-kuvissa.	50
5.8	SEM- ja mikroskooppikuvista nähdään ultraäänen aiheuttama korkean harjanteen tuhoutuminen mutkissa.	52
5.9	Epitaksiaalirakenteesta lävitse syövytetty harjanne, jonka reunassa BCB on irtoillut ja seinä syöpynyt.	53
5.10	SEM-kuva erityisesti harjanteen reunoille muodostuvista pilareista. Pahimmillaan pilarit peittävät koko altaan pohjan.	54
5.11	SEM-kuvat syövytetyistä altaista ICP-syövytyksen jälkeen kuvattuna. b)-kohdan näytteen seinämän röpöliäisyys vaikuttaa a)-kohdan näytettä hienojakoisemmalla. Kummassakin tapauksessa seinämät vaikuttavat puhtailta ilman kontaminaatiojäämiä.	55
5.12	(a) Mutka-alueen harjanteen toinen ICP-syövytysvaihe resistimaskin avulla aikaisemmin kasvatetun piidioksidin suojatessa muita alueita. (b) Liioiteltu malli valmiin Euler-SOA -komponentin rakenteesta. (c) Valmiin komponentin sisältämät materiaalikerrostumat. Kuvasta nähdään myös mutkan alkaessa muodostuva askelma.	57

6.1	Kuvakooste mittauksissa käytetyistä katkaisumerkki-SOA- siruista ja faseteista mikroskoopilla kuvattuna.	60
6.2	SEM-kuvat syövytetyistä altaista ICP-syövytyksen jälkeen kuvattuna. b)-kohdan näytteen seinämän röpöliäisyys vaikuttaa a)-kohdan näytettä hienojakoisemmalla. Kummassakin tapauksessa seinämät vaikuttavat puhtailta ilman kontaminaatiojäämiä.	62
6.3	PI-käyrät eri mittaisille suorille RWG-siruille. Käyrien kynnysvirrat ja kulmakertoimet riippuvat kaviteetin pituudesta. Muutoin harjanteen leveydestä riippumatta sirujen toiminnassa ei juurikaan ole eroja.	65
6.4	Esimerkki sovitteesta differentiaalisen kvanttihyötysuhteen inverssistä kaviteetin pituuden funktiona näytteen 2 2,1 μm harjanteelle. Katkoviivoilla on merkitty sovitteelle 95% luottamusrajat. Rajat ovat varsin leveät, mutta luottamusta sovitteen toimivuuteen lisää muiden vastaavien sovitteiden vastaavanlainen istuvuus.	66
6.5	Tulosten analyysiä.	67
6.6	PI-käyrät Euler-SOA U-mutkaisille näytteille 1 ja 2. Kuvista nähdään näytteen 2 tuottavan parempia tehoja pienemmällä hajonnalla kuin näyte 1.	68
6.7	Lasketut mutkahäviöiden arvot Euler-SOA -siruille mutkan minimisäteen funktiona. Kuvassa ovat näkyvissä sekä näytteen 1 että 2 arvot. Arvoista nähdään näytteen 1 häviöiden saavan huomattavasti näytettä 2 suurempia arvoja. Näytteen 2 eri harjanteen leveyksien välillä häviöissä ei ole havaittavissa selvää eroa. Tuloksissa mutkahäviöt eivät havaittavasti vaihtelevat mutkan kääntösäteen funktiona, kuten yleensä kirjallisuudessa on havaittu [5, 27].	69

TAULUKKOLUETTELO

6.1	Suorien 1000 μm , 2040 μm ja 3040 μm RWG-sirujen mittaus- ja analyysitulokset näytteille S1 ja S2 realisoituneille harjanteen leveyksille 1,4 μm , 1,0 μm , 2,1 μm ja 2,5 μm	66
1	Katkaisumerkki SOA -prosessin vaiheet	77
2	Euler SOA -prosessin vaiheet	78
3	Suorien 1000 μm , 2040 μm ja 3040 μm RWG-sirujen mittaus- ja analyysitulokset näytteille S1 ja S2 realisoituneille harjanteen leveyksille 1,4 μm , 2,0 μm , 2,1 μm ja 2,5 μm	79
4	U-mutkaisten 64 μm , 84 μm , 114 μm , 83 μm , 103 μm ja 133 μm minimisäteisten Euler-sirujen mittaus- ja analyysitulokset näytteille S1 ja S2 realisoituneille harjanteen leveyksille 1,4 μm , 1,0 μm , 2,1 μm ja 2,5 μm	80

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AlGaAs	alumiinigalliumarsenidi
AZ351B	HCl-pohjainen kehiteliuos
AZ6612	fotolitografiaresisti
AZ6632	fotolitografiaresisti
AZ5214E	käänteinen fotolitografiaresisti
AZ726 MIF	TMAH-kehitysluos
BCB	DOW:n Cyclotene-polymeeri
BCl ₃	booritettrakloridi
BHF	bufferoitu vetyfluorihappo
Chemlox	puolijohteen kiillotusliuos
CHF ₃	trifluorimetaani
e ⁻	elektroni
EU	Euroopan unioni
EXD	energia-dispersiivinen röntgenspektroskopia, eng. energy-dispersive X-ray spectroscopy
FP	Fabry-Perot
GaAs	galliumarsenidi
GaInNAsSb	gallium, indium, typpi, arseeni, antimoni
h ⁺	aukko
HCl	suolahappo
HMDS	heksametyylidisilatsalaani
HOM	korkeamman kertaluvun muoto, eng. higher order mode
HPC	korkean suorituskyvyn laskenta, eng. high performance computing
H ₂ O ₂	vetyperoksidi
H ₂ SO ₄	rikkihappo
ILV	virta, valo, jännite, eng. current, light, voltage
ICP	induktiivisestü kytketty plasma, eng. inductively coupled plasma
laser	eng. light amplification by stimulated emission of radiation
LD	laserdiodi
LDC	laserdiodien karakterisointi, eng. laser diode characterization
LED	eng. light emitting diode
MBE	molekyyliisuihkuepitaksia, eng. molecular beam epitaxy
NH ₃	ammoniakki

NH ₄ OH	ammoniumhydroksidi
ORC	Optoelektroniikan tutkimuskeskus
PECVD	plasma-aktivoitu kemiallinen höyryfaasimenetelmä, eng. plasma enhanced chemical vapour deposition
RAPIDO	EU-projekti, eng. Revolutionary Advances in Photonics Integration Being Applied for Optical Communication
RF	suurtaajuinen radiosignaali, eng. radio frequency
RIE	reaktiivinen ionisyövytys, eng. reactive ion etching
RWG	harjanneaaltojohde, eng. ridge waveguide
SEM	pyyhkäisyelektronimikroskooppi, eng. scanning electron microscope
SF ₆	rikkiheksafluoridi
SiCl ₄	piitettrakloridi
SiH ₄	silaani
SiN _x	piinitridi
SiO ₂	piidioksidi
SOA	optinen puolijohdevahvistin, eng. optical semiconductor amplifier
SOI	pii-eriste -alusta, eng. silicon-on-insulator
S1165	liuotin
TMAH	tetrametyyliammoniumhydroksidi
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
TW	kulkuaalto, eng. traveling wave
UV	ultravioletti
VTT	Valtion Teknologian Tutkimuskeskus
<i>a</i>	skaalauskerroin
<i>a</i>	ulottuvuus, dimensio
<i>b</i>	ulottuvuus, dimensio
<i>B</i>	bimolekulaarinen rekombinaatiokerroin
<i>c</i>	valon nopeus
<i>C</i>	Fresnel'n integraali
<i>d</i>	ulottuvuus, dimensio
<i>E</i>	energia
<i>f</i> ₀	voima
<i>F</i>	voima
<i>f</i>	miehitystodennäköisyys
<i>g</i>	vahvistus

$\langle g \rangle$	muotovahvistus
g_0	vahvistuskerroin
g_{th}	kynnysvahvistus
$\langle g_{th} \rangle$	muotokynnysvahvistus
G	suursignaali vahvistus
G_0	saturoitumaton vahvistus
h	Planckin vakio
I	virta
I_{th}	kynnysvirta
I_z	jäyhyysmomentti
J	virrantiheys
J_{tr}	läpinäkyvyysvirrantiheys
k	jännityskonsentraatiokerroin
\mathbf{k}	aaltovektori
L	kaviteetin pituus
M	taivutusmomentti
n	taitekerroin
n_{eff}	efektiivinen taitekerroin
N_{tr}	varauksenkuljettajien läpinäkyvyystiheys
P_0	ulostuloteho
P_s	saturoitumisteho
q	alkeisvaraus
r	terävyys säde
r_c	kriittinen etäisyys
R	heijastavuus
R_b	kaartuvuussäde
R_f	Fresnel'n heijastus
S	Fresnel'n intergraali
t	ulottuvuus, dimensio
U	sähkökenttä
V	tilavuus
v	etenemisnopeus
v_c	kriittinen nopeus
V_e	elektronien levittäytymistilavuus
V_f	fotonien levittäytymistilavuus
w	leveysparametri

α_b	mutkahäviöt
α_B	mutkahäviöt
α_C	kytkentähäviöt
α_L	absorptio substraattiin
α_m	peilihäviöt
α_S	sirontahäviöt
$< \alpha_i >$	sisäiset häviöt
β_m	etenemiskerroin
Γ	rajauskerroin
η_d	differentiaalinen kvanttihyötysuhde
η_i	sisäinen kvanttihyötysuhde
η_s	PI-käyrän kulmakerroin
θ	kulma
λ	aallonpituus
ν	taajuus
σ_{Max}	taivutusjännitys
ω	kulmataajuus

1. JOHDANTO

Tässä työssä esily tutkimus- ja kehitystyö on osana EU-projektia (FP7-ICT-2013-11) nimeltään RAPIDO (Revolutionary Advances in Photonics Integration Being Applied for Optical Communication). Projektin päämääränä on kehittää nopeaan optiseen kommunikaatioon käytettävää teknologiaa. Pääasiallisena sovelluskohteena ovat korkean suorituskyvyn järjestelmät (eng. high performance computing, HPC), kuten supertietokoneet. Tavoitteena on saavuttaa 80 Gb/s tiedonsiirtonopeus yhtä aallonpituutta kohti kahdeksalla eri aallonpituuskaistalla. [28]

Osana kehitettävää systeemiä ovat optiset puolijohdevahvistimet (eng. semiconductor optical amplifier, SOA). SOA:t ovat oleellinen osa optisia tiedonsiirtojärjestelmiä. Niiden avulla voidaan vahvistaa systeemissä kulkevaa optista signaalia ilman aikaa vievää signaalin muutosta elektroniseksi ja takaisin optiseksi. [17]

Optoelektroniikan tutkimuskeskus (ORC) TTY:llä kehittää puolijohdemateriaaleja 1,3 μm aallonpituudella [14]. Näistä materiaaleista kehitetään puolestaan muun muassa SOA-komponentteja, joiden integroitavuuteen ja tehokkaamman pakkauksen mahdollistamiseen tässä työssä keskitytään.

Tätä tavoitetta lähestytään kahdesta eri näkökulmasta. Ensimmäinen on SOA-komponenttien pituuden vaihtelun minimoiminen. Tällöin komponenttien liittäminen erilliselle alustalle tapahtuu mahdollisimman tarkasti, jolloin valo saadaan kytkettyä vahvistimesta alustaan vähäisin häviöin. Kyseiset alustat ovat Valtion Teknologian Tutkimuskeskuksen (VTT) kehittämiä pii-eriste-alustoja (eng. Silicon-On-Insulator, SOI) [1, 2, 9, 8, 10]. Pituusvaihtelun pienentämiseksi työssä esitellään sirujen pilkkomista avustavat katkaisumerkit, jotka syövytetään valmiiksi puolijohteen pintaan valmistusprosessin aikana.

Toisena kehityksen kohteena ovat komponentit, joiden tavoitteena on yhtäläisesti helpottaa valon kytkeytymistä vahvistimen ja alustan välillä. Tässä tapauksessa ratkaisuna haetaan valon sisään- ja ulostulokanavien tuomista samalle puolelle

komponenttia taivuttamalla vahvistimen aaltojohdekanava U-mutkalle. Tämän seurauksena komponentin koko pienenee ja systeemin pakkaus tehostuu.

Aaltojohdekanavan taivuttaminen mutkalle tuottaa ongelmia valon kanavassa pysymisessä aiheuttaen merkittäviä häviöitä [26]. VTT:llä vastaavia kokeita on tehty pii-alustoilla ja ongelman ratkaisemiseksi mutkan muodossa on käytetty Cornuspiraalia, eli niin kutsuttua Euler-spiraalia [10, 24]. Spiraalin muodon on havaittu mahdollistavan mutkasäteen merkittävän pienentämisen [9]. Tässä työssä esitellään vastaavien mutkien soveltaminen galliumarsenidi pohjaisille materiaaleille SOA-sirujen kehityksessä. Erityisesti tarkastellaan mutkan tuottamien häviöiden vaikutusta komponenttien toimintaan. Toiminnallisuutta arvioidaan käyttämällä komponentteja laserdiodeina.

Luvussa kaksi käsitellään puolijohdelaserdiodien ja SOA:n toimintaa teoriassa. Luvussa kolme esitellään katkaisumerkkien käyttö SOA-siruissa ja luvussa neljä Euler-mutkien soveltaminen SOA-siruihin. Luvussa viisi käydään lävitse komponenttien käytännön kehitystyö, jonka tulokset esitellään luvussa kuusi. Luvussa seitsemän kootaan tulokset yhteen ja hahmotellaan tulevaa kehitystyötä.

2. PUOLIJOHDELASERDIODIT JA OPTISET PUOLIJOHDEVAHVISTIMET

Tässä luvussa käydään lävitse työlle oleellista puolijohdelaserdiodien toiminnan teoriaa. Aluksi esitellään puolijohdeiden vahvistavia ominaisuuksia ja tutustutaan reunaemittovien Fabry-Perot -laserdiodien toimintaperiaatteeseen. Tämän jälkeen syvennytään työssä käytetyn RWG-laserdiodityypin (harjanneaaltojohde, eng. ridge waveguide) esittelyyn. Lopuksi tutustutaan optisiin puolijohdevahvistimiin.

2.1 Puolijohdelaserdiodit

Laserit (eng. light amplification by stimulated emission of Radiation) ovat laitteita, jotka tuottavat koherenttia, monokromaattista valoa. Laserin aallonpituus voi olla joko infrapunan, näkyvän valon, ultravioletin tai röntgenin aallonpituusalueella. Yksinkertaistaen laser tarvitsee toimiakseen energianlähteen ja heijastavin peilein rajatun, valoa vahvistavan aineen täyttämän alueen, kaviteetin. Riippuen käytetystä vahvistavasta materiaalista, laserit voidaan jaotella seuraaviin kategorioihin: kiinteämolomuodon-, kaasus- ja nestelaserit. Tässä työssä keskitytään kiinteämolomuodon puolijohdelaserdiodeihin liittyvien sovellusten tarkasteluun. [34] Tämän lisäksi puolijohdelaserit voidaan luokitella valonkulkusuunnan mukaan reuna- ja pintaemittoviin lasereihin. Tässä työssä käsiteltävät laserit ovat reunaemittovia Fabry-Perot -laserdiodeita (lyhennetään FP-LD), joiden virransyötönsäätely perustuu harjanneaaltojohderakenteeseen.

2.1.1 Vahvistavat puolijohdemateriaalit ja pin-liitos

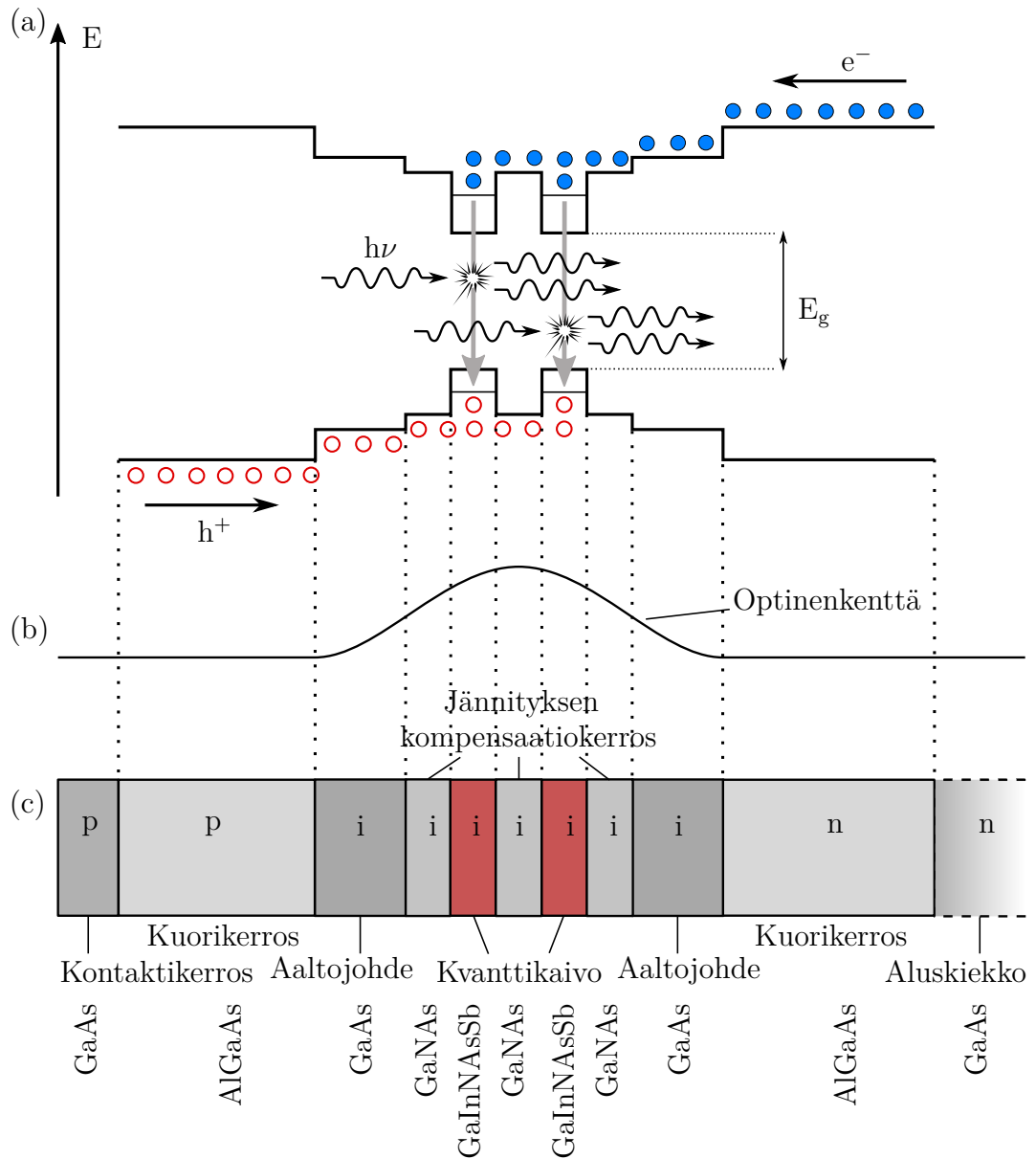
Puolijohdeiden vahvistavat ominaisuudet perustuvat puolijohdeille ominaiseen energiaaukkoon. Tässä työssä käytettävät materiaalit ovat kiinteämolomuodon kiderakenteisia puolijohdeita. Näille on tyypillistä atomien muodostama järjestynyt kiderakenne,

kidehila, jossa atomit ovat järjestyneet geometrisesti tietyille paikoille. Järjestymiseen vaikuttavat kunkin aineen atomien koko ja elektronirakenne, joka vaikuttaa myös atomien väliseen etäisyyteen hilassa. [25]

Puolijohdelaserit ovat toiminnaltaan diodeita, joissa hyödynnetään puolijohteille ominaista osittaista sähkönjohtavuutta. Tätä johtavuutta voidaan muokata seostamalla puolijohdetta epäpuhtauksilla. Tuomalla puhtaaseen puolijohteeseen pieniä määriä toisen alkuaineen atomeita, joiden valenssielektronien määrä on joko pienempi tai suurempi kuin puolijohteella saadaan aikaan joko negatiivisten elektronien tai positiivisten aukkojen ylimäärä. Nämä ylimääräiset varauksenkuljettajat puolestaan herkästi virittyvät ja saavat aikaan puolijohteen johtavuuden. [33]

Puolijohdediodi perustuu kaksoisheteroliitokseen eli pin-liitokseen, jossa toisiinsa on yhdistetty eri tavoin seostettuja puolijohdemateriaaleja. Rakenne koostuu elektroneilla seostetusta n-kerroksesta, aukoilla seostetusta p-kerroksesta ja näiden väliin tulevasta seostamattomasta intrisiittisestä kerroksesta. Energia-aukko intrisiittisellä alueella on seostettuja materiaaleja pienempi, jolloin varauksenkuljettajat luonnollisesti kulkeutuvat energiatasoista muodostuvaan kuoppaan. Kuvassa 2.1 (a) ja (c) on esitetty pin-rakenteeseen perustuva rakenne. Kuvassa 2.1 (a) nähdään energiatasojen käyttäytyminen rakenteessa. Kuvassa 2.1 (c) nähdään seostettujen ja seostamattomien puolijohdekerrosten vuorottelu. [11]

Lasereiden toiminta perustuu varauksenkuljettajatiheyden populaatioinversioon perustilan ja viritetyn energiatilan välillä. Kun varauksenkuljettajien suhde saavuttaa kriittisen pisteen, jossa perustilan miehitystodennäköisyyden f_1 ja viritetyn tilan miehitystodennäköisyyden f_2 (eng. occupation probability) välinen suhde saavuttaa pisteen, jossa $f_2 > f_1$ puhutaan populaatioinversiosta. Tällöin viritystilan purkauksessa ja elektroni-aukko -parin rekombinoituessa vapautuva energia ei absorboitu takaisin materiaaliin elektroni-aukkoparien virityksissä vaan vapautuu ympäristöön valona. Jos materiaali emittoi enemmän energiaa valona kuin absorboi, materiaalin sanotaan vahvistavan. Vahvistus g kertoo kuinka paljon signaali vahvistuu jollakin tietyllä matkalla kulkiessaan materiaalin lävitse. Puolijohteiden pin-liitoksen tapauksessa materiaaliin tuodaan varauksenkuljettajia pumppaamalla rakennetta sähkövirralla, jolloin saavutetaan populaatioinversio. Pin-liitokessa elektronit kulkeutuvat intrisiittiselle alueelle ja rekombinoituvat tällä pienimmän energia-aukon alueella. Tästä rekombinaatiosta on esimerkki kuvassa 2.1(a). [33][11]

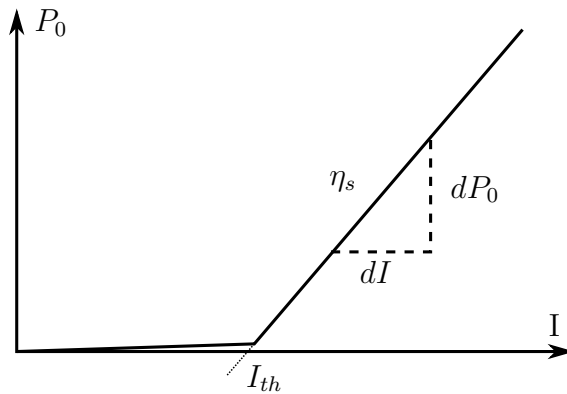


Kuva 2.1 (a) Periaatepiirros energiatasoista kaksoiskvanttikaivorakenteessa. Energia-aukko on pienimmillään kvanttikaivojen kohdalla. Tuomalla kvanttikaivoille elektroneja (ja aukkoja) saadaan aikaan elektroni-aukkoparien stimuloitu emissio fotonin katalysoimana. (b) Hahmotelma optisenkentän jakautumisesta materiaalissa suhteessa epitaksiaalirakenteeseen. (c) Epitaksiaalirakenne, johon punaisella on merkitty kvanttikaivot, joiden alueella rekombinaatio tapahtuu. Merkinnyt p ja n osoittavat materiaalin seostuksen. i tarkoittaa intrinsiittistä eli seostamatonta aluetta. Kuvaan on myös merkitty työssä käytettyjen epitaksiaalimateriaalien koostumus.

2.1.2 Reunaemittöivan laserdiodin rakenne

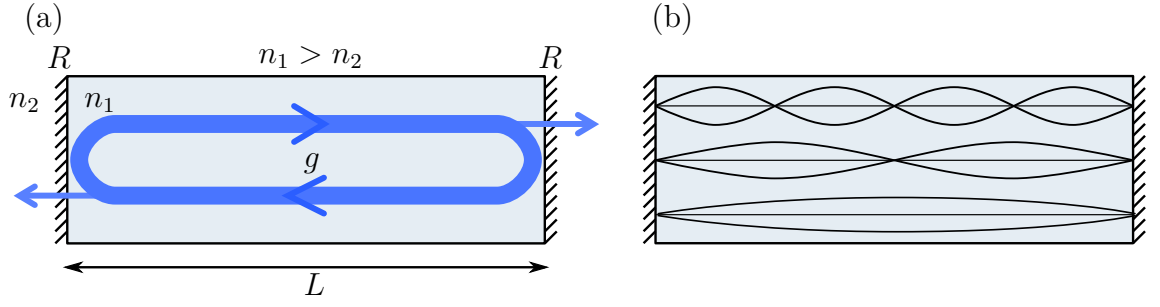
Pelkkä vahvistus ei itsessään riitä laserin toiminnalle. Valoa tuottavia pin-komponentteja, joilla komponentin häviöt ovat materiaalin vahvistusta g suuremmat kutsutaan LED:ksi (eng. light emitting diode). LED:ien tapauksessa valoa tuottava mekanismi on spontaani rekombinaatio. Tässä tapauksessa fotonin aallonpituus määräytyy energia-aukon perusteella, mutta sen vaihe on satunnainen.

Laserdiodin toiminta vaatii, että vahvistus ylittää sisäiset häviöt. Sitä vahvistuksen raja-arvoa, jolla laserointi alkaa kutsutaan kynnysvahvistukseksi g_{th} . Vastaavasti virtaa, jolla tämä raja saavutetaan, kutsutaan kynnysvirraksi I_{th} . Kun tämä raja ohitetaan, kasvaa ulostuloteho virran suhteen merkittävästi periaatekuvan 2.2 esittämällä tavalla. Suoran kulmakerroin $\eta_s = dP_0/dI$ antaa tietoa diodin toiminnan hyötysuhteesta, kuten seuraavaksi nähdään. Kun kynnysvirta saavutetaan, häviöt ja vahvistus materiaalissa ovat yhtä suuret.



Kuva 2.2 Periaatepiirros laserdiodin PI -käyrästä. Kynnysvirtaa I_{th} alhaisemmilla virroilla diodi toimii LED:nä. Kynnysvirralla vahvistuksen ja häviöiden määrät ovat yhtä suuret, jolloin diodi alkaa laseroimaan. Käyrän kulmakerroin $\eta_s = dP_0/dI$ kertoo laserdiodin hyötysuhteesta.

Fabry-Perot -lasereiden tapauksessa, jotta vaadittu vahvistus saavutetaan tarvitaan heijastavin peilein rajattu kaviteetti, jossa rekombinaatiossa syntyvät fotonit resonovat kulkiessaan kaviteetissa edes takaisin. Kuvassa 2.3 (a) on havainnollistus tästä. Stimuloidussa emissiossa ohikulkeva foton stimuloi elektroni-aukko rekombinaation, jonka seurauksena emittoituu foton, jonka vaihe vastaa stimulaation aiheuttaneen fotonin vaihetta. Stimuloidun emission seurauksena jokaisella läpikulukierroksella fotonit stimuloivat lisää rekombinaatioita ja kaviteetissa resonovan valon intensiteetti kasvaa. [11]



Kuva 2.3 (a) Havainnekuva Fabry-Perot -kaviteetista. Vahvistavaa materiaalia (vahvistus g) ympäröivät peilit (heijastuvuus R), jotka puolijohdeiden tapauksessa muodostuvat ilman ja puolijohdeiden rajapinnasta. Valo resonoi kaviteetissa ja vahvistuu joka kierroksella. Samalla osa valosta karkaa kaviteetista. (b) Fabry-Perot -kaviteetti vahvistaa ainoastaan niitä aallonpituuksia, joille pätee $L = m\lambda/2n_{eff}$, missä m on luonnollinen luku ja n_{eff} efektiivinen taitekerroin. Nämä aallonpituudet resonoiivat kaviteetissa muodostaen seisovan aallon.

Laserdiodin toiminnan tehokkuutta kuvaa muun muassa diodin sisäinen kvanttihyötysuhde η_i . Sisäinen kvanttihyötysuhde kertoo sen osuuden diodiin syötetystä virrasta, joka päätyy aktiivialueelle. Tämä sisältää kaikki aktiivialueelle päätyvät elektronit, eikä vain rekombinaatioon osallistuvia. Hyötysuhdetta, joka mittaa ulostulevien fotonien suhdetta sisään syötettyihin elektroneihin, kutsutaan differentiaalisesti kvanttihyötysuhteeksi η_d . Differentiaalinen kvanttihyötysuhde voidaan määrittellä sisäisen hyötysuhteen ja häviöiden avulla seuraavasti [11]

$$\eta_d = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \langle \alpha_i \rangle}, \quad (2.1)$$

missä α_m on kaviteetin peilihäviö ja $\langle \alpha_i \rangle$ sisäinen häviö. Näiden merkitystä systeemissä tarkastellaan myöhemmin. Ideaalisesti ulostuloteho muodostaa kynnysvirran yläpuolisella alueella tasaisen, lineaarisen käyrän, jonka kulmakerroin on dP_0/dI . Ulostuloteholle voidaan kirjoittaa virran funktiona yhtälö

$$P_0 = \eta_d \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}), \quad (2.2)$$

missä h on Planckin vakio, q alkeisvaraus ja ν valon taajuus. [11]

Lähestyttäessä differentiaalisen hyötysuhteen määritelmää ulostulotehon P_0 kautta

voidaan differentiaalinen kvanttihyötysuhde määrittellä laserdiodin PI- käyrän kulmakertoimen kynnysvirran yläpuolisen osan avulla järjestelemällä yhtälö 2.2 uudelleen muotoon [11]

$$\eta_d = \frac{q}{h\nu} \frac{dP_0}{dI}. \quad (2.3)$$

Laserdiodin sisäiset häviöt ja sisäinen kvanttihyötysuhde voidaan määrittää kokeellisten tulosten avulla yhtälöllä [11]

$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{\langle \alpha_i \rangle}{\eta_i \ln(1/R)L} + \frac{1}{\eta_i}, \quad (2.4)$$

jossa differentiaalisen kvanttihyötysuhteen inverssin arvot piirretään kaviteetin pituuden funktiona ja sovitetaan suora saatuihin pisteisiin. Lausekkeessa R on heijastuvuus ja L kaviteetin pituus. Yhtälön 2.4 avulla suorasta saadaan $\langle \alpha_i \rangle$ ja η_i arvot.

Kynnysvirran tiheydelle voidaan käyttää yhtälöä [11]

$$I_{th} \cong \frac{qVBN_{tr}^2}{\eta_i} e^{2(\langle \alpha_i \rangle + \alpha_m)/\Gamma g_0}, \quad (2.5)$$

missä V on aktiivialueen tilavuus, B bimolekulaarinen rekombinaatiokerroin, N_{tr} varauksenkuljettajien läpinäkyvyystiheys (eng. transparency carrier density) ja g_0 vahvistuskerroin. Yhtälöstä 2.5 saadaan kynnysvirrantiheys jakamalla virransyöttöalueen pinta-alalla. Tämän avulla voidaan määrittää kynnysvirrantiheys äärettömän pitkässä kaviteetissa, jolloin peilihäviöt lähestyvät nollaa.

Kaviteettia rajaavista peileistä vähintään toisen peilin on luonnollisesti läpäistävä osin valoa, jotta valo saadaan ulos kaviteetista. Kiteisten puolijohteiden ja erityisesti reunaemittovien lasereiden tapauksessa rajaavina peileinä voidaan käyttää puolijohteen ja ilman muodostamaa rajapintaa. Puolijohteilla tasainen, heijastava fasetti on mahdollista toteuttaa, koska kiderakenteen ansiosta materiaali voidaan pilkkoa kidetason mukaisesti, jolloin lopputuloksena on tasainen peilipinta. Osittainen heijastus puolestaan saavutetaan puolijohteen ja ilman taitekertoimien (n_1, n_2) sopivan suhteen ($n_1 > n_2$) ansiosta. Galliumarsenidilla heijastuvuus R on luokkaa 0,3 valon

osuessa rajapintaan kohtisuoraan. Rajapinnassa syntyy tästä johtuen peilihäviöitä α_m osan valosta poistuessa kaviteetista laserista ulostulevana valona. Peilihäviöiden suuruus on suhteessa komponentin pituuteen L , sillä mitä pidempi vahvista kaviteetti on kyseessä, sitä pienempi on peilien kautta tapahtuvien häviöiden osuus suhteessa matkaan, jonka aikana valo ehtii vahvistumaan heijastusten välissä. Tämä voidaan ilmaista lausekkeella

$$\alpha_m = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right). \quad (2.6)$$

Heijastuvuus kullekin materiaalille, tulokulmalle ja aallonpituudelle voidaan laskea Fresnel'n yhtälöistä. [15],[11]

Peilihäviöiden lisäksi laserdiodissa energiaa menetetään sisäisten häviöiden kautta. Sisäisiin häviöihin lukeutuvat ne siirron ja absorption tuottamat häviöt, jotka eivät kuulu stimuloidun emission nopeusvakion piiriin [11]. Muodolle (termi määritellään myöhemmin tarkemmin) ominaisista sisäisistä häviöistä käytetään tässä lyhennettä $< \alpha_i >$. Sisäisten häviöiden ja peilihäviöiden avulla voidaan määritellä kynnysmuotovahvistus [11]

$$< g_{th} > = \Gamma g_{th} = \alpha_m + < \alpha_i > = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right) + < \alpha_i > . \quad (2.7)$$

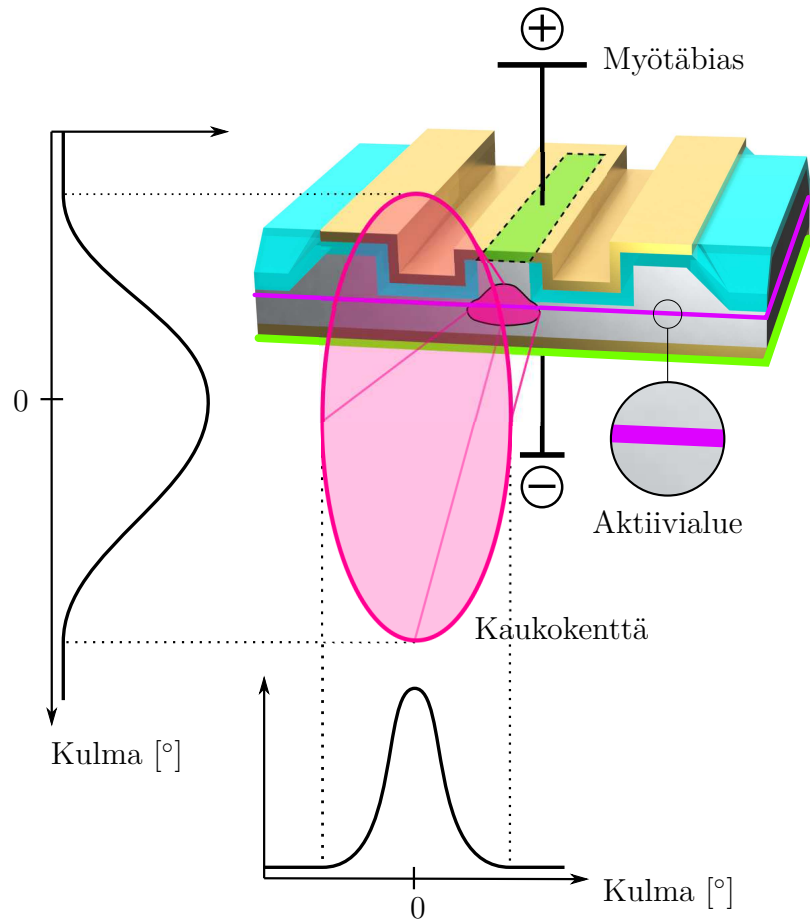
Tässä Γ on rajauserroin, joka määrittää millaisen osuuden materiaalin vahvistuksesta muoto kokee. Rajauserroin käsitellään tarkemmin tulevassa osiossa.

Laserdiodin toimintaa kuvaa myös läpinäkyvyysvirrantiheys J_{tr} , joka kertoo virrantiheyden arvon silloin, kun stimuloidun emission ja materiaalin absorptiionopeuden arvot ovat yhtä suuret ja vahvistus on nolla [11]. Läpinäkyvyysvirrantiheydelle ja vahvistuskertoimelle voidaan laskea arvot sovittamalla lauseke [11]

$$J = J_{tr} e^{\frac{g}{g_0}} \quad (2.8)$$

kullekin muodolle ominaisen kynnysmuotovahvistuksen ja kynnysvirrantiheyden mitaustulosten arvojen kuvaajaan.

Laserin toiminnan kannalta on myös oleellista, että ulostulevan säteen muoto on



Kuva 2.4 Virransyöttö (merkitty vihreällä) laserdiodisiruun harjanteen kautta sinisellä merkityssä eristeessä olevan avauksen kautta. Keltainen alue sirun alla ja päällä kuvaa kontaktimetallia. Punaisella kuvaan on merkitty hahmotelma harjanteen rajaamasta optisesta kentästä ja sen leviämisestä kaukokentäksi. Kaukokentän muoto x - ja y -akselien suunnassa on gaussinen.

haluttu. Tähän voidaan vaikuttaa rajoittamalla fotonijakaumaa kaviteetissa pituussuunnan lisäksi myös pystysuunnassa ja poikittain. Rajoittaminen voidaan tehdä sekä säätelemällä aluetta, jolle virtaa syötetään erityisesti leveyssuunnassa, sekä rajaamalla kanava optisilla aaltojohteilla leveys- ja pystysuunnassa suhteessa kentän etenemissuuntaan. [11]

Rajoittamalla optista kenttää aaltojohteilla luodaan reunaehdot sallituille sähkökentän muodoille. Pitkittäiset muodot valon etenemissuunnassa rajoittuvat kaviteetin pituuden mukaan. Mahdollisia aallonpituuksia ovat ne, joille kaviteetin pituus $L = m\lambda/2n$, missä m on kokonaisluku [38]. Kuvassa 2.3 (b) hahmotellaan tätä.

Erityisesti ulostulevan säteen muotoon vaikuttavat säteen kulkusuunnan suuntaiset rajapinnat, jotka valikoivat mahdolliset poikittaiset muodot. Tässä suunnassa eri muodoilla on omat intensiteettiprofiilinsa. Monesti tavoitellaan toimintaa perusmuodolla, jolloin intensiteettijakaumat x- ja y-suunnassa ovat yksinkertaisimmillaan gaussisia. Tätä tilannetta hahmotellaan kuvassa 2.4. [11]

Aaltojohteilla optisen kentän rajoittaminen perustuu erilaisten taitekertoimien muodostamissa rajapinnoissa tapahtuvaan kokonaisheijastukseen. Pystysuunnassa tämä rakenne toteutetaan erilaisilla puolijohdemateriaaleilla, jotka kasvatetaan tässä tapauksessa molekyyliisuihkuepitaksialla (eng. molecular beam epitaxy, MBE) [33]. Kokonaisuudessaan laserin toiminnallinen aktiivikerrosrakenne kasvatetaan puolijohdekiekon päälle kerroksittain. Pohjana toimivan puolijohdekiekon pintaan tuodaan atomeja, jotka järjestyvät pintaan pohjakiteen hilan ohjaamana. Materiaalit valitaan siten, että hilavakioiden erot tuottavat mahdollisimman vähän haitallista jännitystä kiderakenteeseen.

Osana tätä rakennetta muodostuu tarvittava pin-liitos. Kuvassa 2.1(c) on esitetty periaatepiirros rakenteesta, joita tässä työssä käsitellyissä komponenteissa on käytetty. Rakenteen keskellä sijaitsee intrinsiittinen kvanttikaivo, jonka alueella rekombinaatio tapahtuu. Kvanttikaivoja voi sovelluksesta riippuen olla rakenteessa useita. Tällöin kvanttikaivoja erottaa jännitystä kompensoiva kerros. Kvanttikaivon molemmin puolin on aaltojohdekerros, jonka alueelle optinen kenttä pyritään rajaamaan, kuten kuvassa 2.1 (b) havainnollistetaan. Tämä tapahtuu, kun aaltojohdekerros ympäröidään kuorikerroksella, jonka taitekerroin on aaltojohteen taitekerrointa pienempi. Tämän lisäksi pintakerroksena on kontaktipuolijohdekerros, jonka tarkoituksena on helpottaa metallikontaktien luomista virran syöttämiseksi materiaaliin. Tämän työn tapauksessa kerrokset ovat seostettu siten, että kvanttikaivojen yläpuoliset kerrokset ovat p-seostettuja ja alapuoliset kerrokset n-seostettuja. Aluskiekko itsessään on seostamaton.

2.1.3 Optinen kenttä ja aaltojohteet

Optisen kentän muotoon voidaan vaikuttaa myös rajoittamalla aluetta, jolle virtaa syötetään. Tämä voidaan toteuttaa useilla erilaisilla pintarakenteilla esimerkiksi fotolitografian avulla kuvioimalla. Tässä työssä on käytetty harjanneaaltojohderakennetta. Kyseinen rakenne muodostetaan syövyttämällä aktiivirakenteeseen harjanne. Virran syöttö rajoitetaan eristeen (esim. piinitridi, SiN_x) avulla vain harjanteen

alueelle. Samalla harjanne toimii myös leveyssuunnassa optisen kentän rajoittimena ilman ja puolijohteen muodostaman rajapinnan ansiosta. Kuva 2.4 hahmottaa virransyöttöä komponenttiin ja sen vaikutusta ulostulevaan optiseen kenttään.

Yleensä muodon optinen kenttä levittäytyy materiaalisia aktiivialueen ulkopuolelle. Tämä tarkoittaa, että elektronien ja fotonien levittäytymistilavuudet V_e ja V_f ovat erisuuruiset. Suhteesta V_e/V_f käytetään nimitystä rajauserroin Γ (eng. confinement factor). Rajauserroin voidaan määritellä sekä kaviteetin poikittaista että pituussuunnassa. Tällöin kokonaismuotovahvistus voidaan kirjoittaa muodossa

$$\langle g \rangle = \Gamma g = \Gamma_{xy} \Gamma_z g, \quad (2.9)$$

missä Γ_{xy} merkitsee poikittaista ja Γ_z pitkittäistä rajauserrointa. Yhteen suuntaan rajauserroin voidaan esittää integraalimuodossa

$$\Gamma_i = \frac{\int_{-d/2}^{d/2} |U(i)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |U(i)|^2 dx}, \quad (2.10)$$

missä $U(i)$ on sähkökenttä ja d tarkasteltavan dimension i suunnassa aktiivialueen koko. Kokonaisuudessaan rajauserroin saadaan kun kaikkien kolmen ulottuvuuden osat kerrotaan keskenään. [11]

Efektiiivinen taitekerroin voidaan määritellä yhtälöllä [38]

$$n_{eff} = \frac{\beta_m}{\omega/c}, \quad (2.11)$$

missä ω on kulmataajuus, β_m muodon m etenemiskerroin ja c valon nopeus tyhjiössä. Etenemiskerroin vastaa aallon aaltovektorin \mathbf{k} ($k = \omega n/c$) etenemissuunnan mukaista komponenttia. Efektiiivinen taitekerroin kuvaa sitä, miten valoalto etenee aaltojohderakenteessa. Rakenteessa, jossa taitekerroin on vakio kauttaaltaan, efektiiivinen taitekerroin on sama kuin materiaalin taitekerroin. Niissä rakenteissa, joissa optinen kenttä ulottuu usean eri taitekerroinalueen ylitse kuten optisissa kuiduissa ja RWG-lasereissa, efektiiivinen taitekerroin ottaa huomioon rakenteen tuoman muutoksen valon etenemisnopeudessa ν . [38]

Rakenteelle, jossa taitekertoimen n_1 materiaalia ympäröi n_2 -materiaali, etenemiskertoimen β tulee toteuttaa ehto [38]

$$\frac{n_2\omega}{c} < \beta < \frac{n_1\omega}{c}, \quad (2.12)$$

joka varmistaa optisen kentän vaimenemisen kuorikerroksessa ja kentän maksimiarvon saavuttamisen aaltojohteen n_1 sisällä. Toisaalta ehto (2.12) voidaan ilmaista efektiiviselle taitekertoimelle muodossa

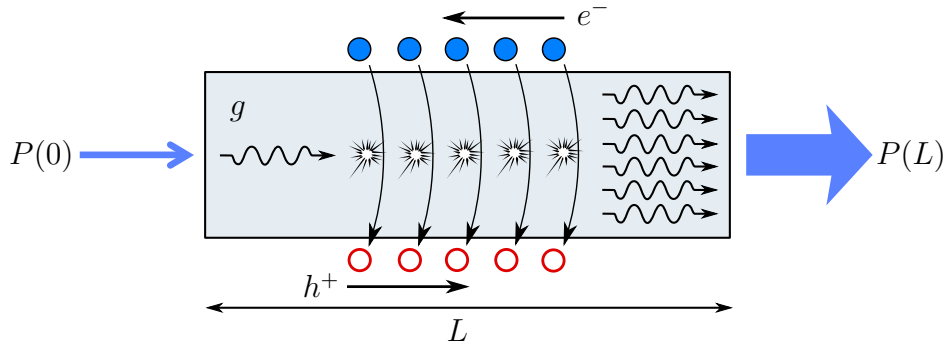
$$n_2 < n_{eff} < n_1. \quad (2.13)$$

2.2 Optiset puolijohdevahvistimet (SOA)

Optiset puolijohdevahvistimet (eng. semiconductor optical amplifier, SOA) ovat nimensä mukaisesti puolijohteesta valmistettuja vahvistinkomponentteja. SOA-komponentteja käytetään optisen signaalin vahvistamiseksi ilman, että signaalia tarvitsee välissä muuttaa sähköiseksi. Tämä nopeuttaa tiedonsiirtoa, sillä signaalin muutokset optisesta sähköiseksi ja toisin päin toimivat pullonkaulana tiedonsiirtonopeudelle. [14] SOA-komponentteja voidaan hyödyntää osana monimutkaisempaa toiminnallista kokonaisuutta digitaalisessa signaalinkäsittelyssä kuten esimerkiksi optisina loogisina portteina tai aallonpituusmuuntimina. [17]

SOA-komponenttien toiminta perustuu laserdiodien tapaan puolijohteen valoa vahvistaviin ominaisuuksiin. SOA:t voidaan jakaa kahteen ryhmään: FP ja kulkuaaltovahvistimiin (eng. traveling wave amplifier, TW). Fabry-Perot -vahvistimet ovat käytännössä toimintaperiaatteiltaan laserdiodeita, mutta niitä käytetään laseroitinkynnyksen alapuolisilla virroilla. Näille ominaista on kaviteetin resonoinnista syntyvä erittäin kapea vahvistuksen kaistanleveys, joka on ongelmallista optisissa systeemeissä. [12, 30]

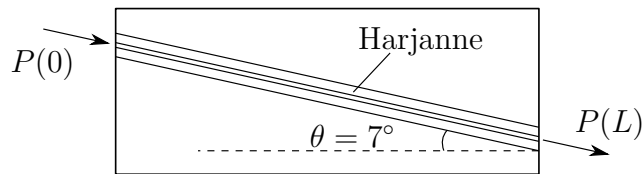
Vaihtoehtona ovat kulkuaaltovahvistimet, jotka poikkeavat FP-vahvistimista siten, että niissä kaviteetin fasettien heijastukset pyritään poistamaan mahdollisimman tehokkaasti. Tällöin valo kulkee komponentin lävitse vain kerran ja vahvistuu matkalla. Tätä toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 2.5. Seurauksena saavutetaan puolijohteen vahvistusspektriä vastaava kaistanleveys. [12]



Kuva 2.5 Vahvistus SOA-komponentissa. TW SOA:ssa päädyissä ei ole merkittävää heijastusta vaan valo kulkee L pituisen komponentin lävitse vain kerran. Sisään tuleva signaali $P(0)$ vahvistuu stimuloitun emission vaikutuksesta kun materiaalia pumpataan sähkövirralla. Toisessa päässä saadaan ulos vahvistunut signaali $P(L)$.

Kaviteetin fasettien heijastuksen poistaminen voidaan toteuttaa kahdella tavalla, usein menetelmiä yhdistäen. Fasettien pinnalle voidaan kasvattaa heijastuksenestopinnoite tai valo voidaan tuoda sopivassa kulmassa puolijohteen rajapintaan heijastuksen minimoimiseksi. Täysin heijastusta ei pystytä faseteilta poistamaan, vaan jäljelle jää vaimea jäännheijastus, joka aiheuttaa väreitä vahvistusspektriin.

Heijastuksenestopinnoite on yksinkertaisimmillaan yhden neljäsosa-aallonpituuden paksuinen dielektrikerros $d = \lambda/4n$, missä n on dielektrin taitekerroin [12]. Todellisuudessa kerrokset ovat monesti kuitenkin monimutkaisempia, useiden erilaisten dielektrikerrosten yhdistelmiä. Tässä työssä käsitellyt komponentit on lopulta tarkoitettu pinnoittamaan, mutta työn kannalta pinnoituksella ei ole merkitystä.



Kuva 2.6 Periaatepiirros SOA-sirusta, jossa RWG on kallistettu 7° kulmaan fasetin normaaliin nähden.

Näkyvämmiin työssä esitellään vinojen aaltojohdekanavien komponentteja. Luvuissa 3 ja 4 esiteltäviin komponentteihin on suunniteltu, kuvassa 2.6 havainnollistettuja, 7° kulmassa olevia RWG:tä. Kyseinen kulma on yleisesti käytetty heijastuksen minimoimiseksi fasetilla. Heijastuksen laskemiseen heijastuskulman θ funktiona voidaan hyödyntää lauseketta [23, 29]

$$R = R_f(\theta) \exp\left[-\left(\frac{2\pi n_2 w \theta}{\lambda}\right)^2\right], \quad (2.14)$$

missä w on muodon leveysparametri ja n_2 aktiivialuetta ympäröivän vaippakerroksen taitekerroin. Fresnel'n heijastus R_f voidaan laskea lausekkeella [23, 29]

$$R_f(\theta) = \left[\frac{n_{ilma} \cos \theta - n_1 \sqrt{1 - (n_1^2/n_{ilma}^2) \sin^2 \theta}}{n_{ilma} \cos \theta + n_1 \sqrt{1 - (n_1^2/n_{ilma}^2) \sin^2 \theta}} \right], \quad (2.15)$$

missä $n_{ilma} = 1$ on ilman taitekerroin ja n_1 aktiivialueen taitekerroin.

SOA:n suursignaali vahvistus G , joka kertoo kuinka paljon komponentti vahvistaa sisään syötettyä signaalia määritellään suoraan ulostulevan $P(L)$ ja sisään syötetyn tehon $P(0)$ suhteena [12]

$$G = \frac{P(L)}{P(0)}, \quad (2.16)$$

missä L on signaalin vahvistimessa kulkema matka. Vahvistavan materiaalin ominaisuuden, vahvistuskertoimen g , avulla teho valon kulkeman matkan z funktiona voidaan ilmaista lausekkeella [11, 12]

$$P(z) = P(0) e^{\Gamma g z}, \quad (2.17)$$

missä Γ on rajauserroin. Materiaalin vahvistuserroin g on aallonpituusriippuvainen. Komponentin vahvistus G puolestaan riippuu optisesta tehosta, jonka kasvaessa riittävän suureksi vahvistus saturoituu. Saturoituminen tapahtuu, kun varauksen kuljettajatiheys tippuu stimuloidun emission kasvaessa riittävän suureksi [11]. Tehoa, jolla saturoituminen tapahtuu, kutsutaan saturoitumistehoksi P_s . Vahvistuksen riippuvuus tehosta voidaan ilmaista lausekkeella [11, 12]

$$G = G_0 \exp \left[-\frac{G-1}{G} \frac{P(L)}{P_s} \right], \quad (2.18)$$

missä $G_0 = \exp(gL)$ on saturoimaton vahvistus.

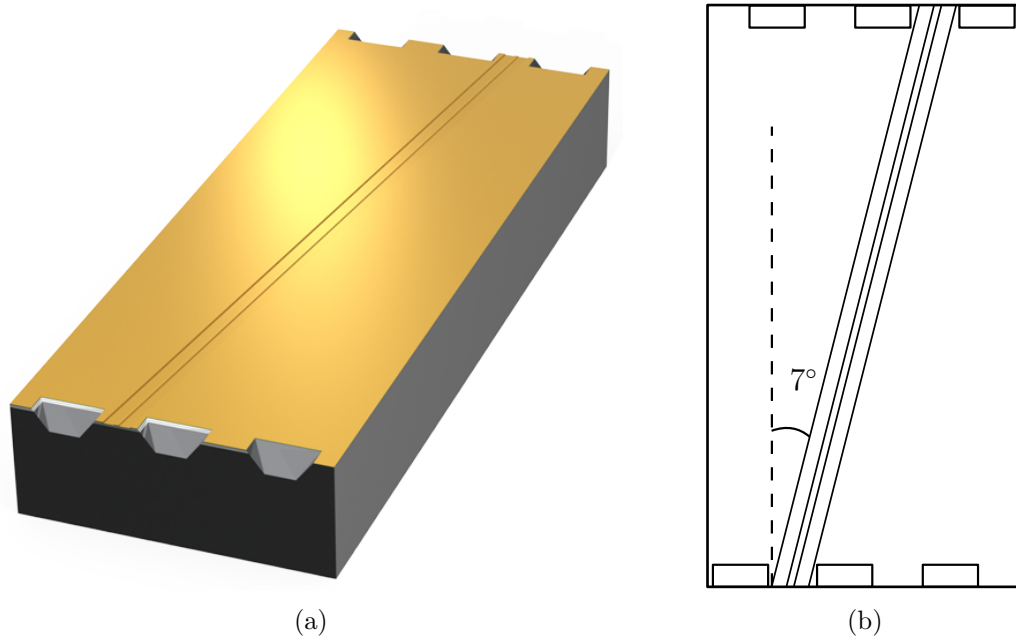
3. KATKAISUMERKIT RWG-SOA-KOMPONENTISSA

Toinen tässä työssä kehitetty komponenttityyppi on luvussa 2 optisia puolijohdevahvistimia käsitelleessä osiossa esitelty vinoon asetettu RWG SOA. Lopullisessa sovelluksessa VTT:n kehittämälle SOI-alustalle tullaan liittämään 11-kanavainen SOA-komponentti vinoilla RWG:llä. Kuvassa 3.1(a) on esitettynä mallinnus yksikanavaisesta testikäyttöön tarkoitettusta komponentista. Kuvassa 3.1(b) on havainnollistettu periaatepiirroksena RWG:n ja erityisesti kehitystyön alla olevien katkaisumerkkien sijainnit. Käytetyt harjanteet ovat kapeita (1-4 μm) optisen kentän yksimuotoisuuden saavuttamiseksi. Katkaisumerkit on suunniteltu sirujen pilkkomisen avustamiseen.

Alusta ja SOA-komponentit pyritään suunnittelemaan siten, että alustalle istutettava komponentti saadaan toistettavasti sijoitettua mahdollisimman tarkasti halutulle paikalle. Esimerkkejä ja tarkempaa tietoa kyseisestä SOI-SOA hybridi-integraatio-systeemistä löytyy VTT:n julkaisuista. [1, 2, 3, 10] SOA-komponentin valon ulostuloalue pyritään kohdistamaan SOI-alustan aaltojohteiden kanssa samaan linjaan, jotta valon kytkeytymisestä rakenteesta toiseen aiheutuisi mahdollisimman vähän häviöitä. Lisäksi rajapintojen väliin jäävän aukon leveyden vaihtelu komponentista toiseen halutaan minimoida. Tämä toteutetaan kehittämällä pilkkomismenetelmä, jonka avulla SOA-komponenttien pituus saadaan mahdollisimman lähelle tavoitepituutta ja pituuksien vaihtelun hajonta pieneksi.

Yleisesti puolijohtekiekkojen pilkkomisessa käytetään työkalua, jolla kiekon pintaan tehdään timanttikärjellä terävä ura, jota pitkin kiekko pakotetaan pilkkoutumaan. Ongelmana menetelmässä on epätarkkuus saavutettavissa komponenttien pituuksissa. Vaihtelun tavoitepituudesta on havaittu käytännössä olevan jopa 10 μm . Tämä haitallisen suuri epätarkkuus pyritään välttämään korvaamalla pilkkomisvaiheessa tehtävä ura pintaan syövytettävillä katkaisumerkeillä, joiden välinen etäisyys määrittyy kuviointivaiheessa käytettävästä fotolitografimaskista. Käytettyjen maskien

kuvioiden pienimmät mahdolliset mitat ovat $0,6 \pm 0,1 \mu\text{m}$.



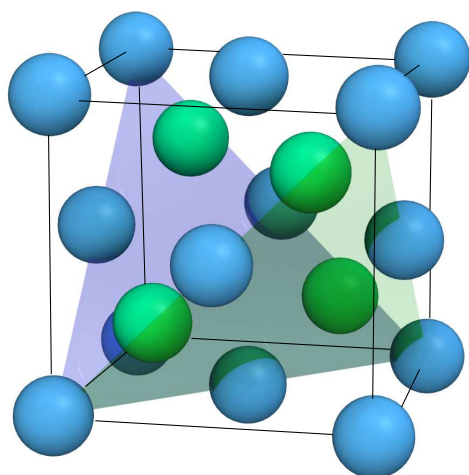
Kuva 3.1 (a) Luonnos kallistetusta SOA-sirusta katkaisumerkkien kanssa. Merkit sijoituvat tasavälein sirun fasetille jättäen tilaa harjanteelle ja altaalle. Kallistuskulma on 7° fasetin normaaliin nähden.

(b) Malli sirusta. Sirun mittasuhteet vastaavat testeissä käytettyjen sirujen mittasuhteita. Kuvan mallissa sirun leveys on $300\mu\text{m}$, pituus $800\mu\text{m}$, paksuus $110\mu\text{m}$ ja katkaisumerkkien periodi $100\mu\text{m}$.

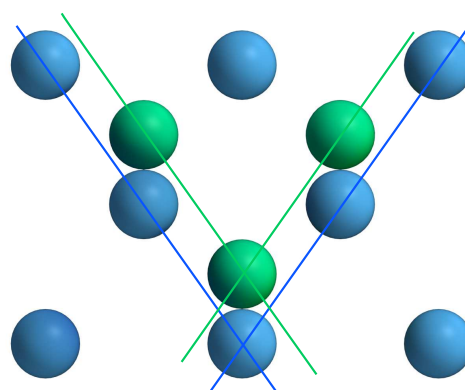
3.1 Kiderakenteet ja märkäsyövytys

Tässä työssä tarkasteltavat puolijohteet ovat olomuodoltaan kiinteitä materiaaleja, joilla on säännöllinen, atomien välisten kovalenttisten sidosten koossapitämä kiderakenne. Tällaisessa rakenteessa atomit ovat asettuneet säännöllisiin geometrisiin muodostelmiin ja keskinäisellä sijoittelullaan muodostavat rakenteeseen hilan, jolle ominaisia ovat eri suuntiin muodostuvat kidetasot, jossa atomit ovat samassa tasossa. Tästä esimerkkinä on kuvassa 3.2(a) GaAs:n yksikkökoppi, johon on merkitty esimerkiksi kaksi $\{111\}$ -kidetasoa. Kuvassa Ga-atomit on merkitty sinisellä ja As-atomit vihreällä. [25]

Kidetasot ovat erityisesti hyödyllisiä puolijohdemateriaalien muokkaamisessa, koska



(a) Galliumarsenidin yksikkökoppi sinkkivälkerakenteella. Sininen ja vihreä taso merkitsevät $\{111\}$ -kidetasoja.



(b) Yksikkökoppi tarkasteltuna kohtisuoraan $\{111\}$ -kidetasojen suunnasta. Kidetasot on merkitty kuvaan viivoilla. Tästä suunnasta nähdään Ga ja As- atomien muodostamia tasoja.

Kuva 3.2 Galliumarsenidin sinkkivälkerakenteen. Galliumatomeita on merkitty kuvassa sinisillä ja arseeniatomeita vihreillä palloilla. Pallojen koot ja keskinäiset etäisyydet eivät vastaa todellisuutta.

ne muodostavat luonnollisen rajapinnan materiaalin sisällä ja vaikuttavat sekä kemiallisiin reaktioihin että mekaaniseen rasitukseen. Kidetasoille ominaista on kidetasosta riippuva syöpymisnopeuden vaihtelu. Tällöin on mahdollista kontrolloida puolijohteeseen muodostuvien syövytettyjen alueiden muotoa kidetasojen avulla. Yhdistepuolijohteiden tapauksessa kiderakenne muodostuu kahdesta tai useammasta eri alkuaineatomista, jotka vuorottelevat rakenteessa. Rakenteesta on löydettävissä kidetasoja, jotka muodostuvat vain toisesta alkuaineesta. Tästä on esimerkkinä kuvan 3.2(b) sinisellä merkityt Ga- ja vihreällä merkityt As- $\{111\}$ -kidetasot. Eri atomeista muodostuneet tasot puolestaan syöpyvät eri nopeuksilla, jolloin syntyviin muodostelmiin saadaan aikaan lisää vaihtoehtoja. [35, 4]

Mekaanisen rasituksen tapauksessa kidetaso toimii lohkoutumistasona, jota pitkin puolijohdekiekko voidaan helposti pilkkoa, kohdistamalla alueelle sopiva jännitys. Tätä ominaisuutta hyödynnetään yleisesti reunaemittävien LD-sirujen pilkkomisessa peilimäisen fasetin muodostamiseksi.

3.2 Mekaaninen tarkastelu

Yleisesti puolijohdelaserkomponenttien pilkkomiseen on käytetty pilkkomistyökalua, jolla kiekon reunaan piirretään timanttikärjellä alkuviillot. Viillot lisäävät paikallisesti jännitystä kidehilassa, jonka seurauksena alueelle kohdistettavan voiman vaikutuksesta puolijohde pilkkoutuu kideatasojen suuntaisesti. Tämä tuottaa ideaalisessa tapauksessa tasaisen, heijastavan peilipinnan, jonka kautta valo on helppo kytkeä komponenttiin ja siitä pois mahdollisimman pienin häviöin.

Puolijohdesirujen pilkkomiseen erikoistuneen laitevalmistaja Dynatexin mukaan [13] kiekon pilkkoutumiseen vaikuttavat pääasiallisesti kiekon poikkileikkauspinta-alan pienentäminen ja pintaan piirretyn uran pohjan terävyys. Uran syvyys on kolmas tekijä, joskin vähemmän merkityksellinen verrattuna kahteen muuhun parametriin. Poikkileikkauspinta-alaan vaikuttaa ennen kaikkea kiekon paksuus ja pilkkoutumislinjan pituus. Suuri vaikutus puolijohteen pilkkoutumiseen on uran terävyydellä, jonka kehittämiseen seuraavassa luvussa paneudutaan tarkemmin. Seuraavaksi käsitellään kiekkojen pilkkoutumisen mekaniikkaa.

Taivutusjännitys σ_{Max} voidaan esittää yhtälöllä [13, 19]

$$\sigma_{Max} = \frac{M}{I_Z} \frac{kt}{2}, \quad (3.1)$$

missä M on taivutusmomentti, t kiekon paksuus, I_Z jäyhyysmomentti ja k jännityskonsentraatiokerroin. Yhdistämällä yhtälöön 3.1 suorakulmaisen kappaleen jäyhyysmomentille annettu yhtälö [19]

$$I_Z = \frac{bt^3}{12}, \quad (3.2)$$

missä b kiekon koko pilkkomislinjaa pitkin, saadaan lauseke

$$\sigma_{Max} = \frac{6kM}{bt^2}. \quad (3.3)$$

Tässä työssä käytetty pilkkomismenetelmä on hahmoteltu Dynatexin patentissa [36]. Menetelmässä piirretyn viillon kohdalle näytteen taakse tuodaan vasara, jolla viilto painetaan kiekon yläpintaan tuotua alasinta vasten. Tällöin kiekkoon saadaan

kohdistettua tasainen voima, joka viillon synnyttämän jännityksen avulla aiheuttaa kiekon pilkkoutumisen viillon kohdalta. Alasimen koko pinnalle tuottama tasainen voima f_0 saadaan yhtälöstä [13]

$$f_0 = \frac{F}{2a}, \quad (3.4)$$

missä F on vasaran voima ja a on palan koko poikkisuorassa linjassa pilkkomislinjaan nähden. Voiman lausekkeen 3.4 avulla voidaan määrittää taivutusmomentti M lausekkeella [13]

$$M = (f_0 a) \left(\frac{a}{2} \right) = f_0 \frac{a^2}{2}. \quad (3.5)$$

Tämän avulla taivustusjännityksen lauseke saadaan ilmaistua muodossa

$$\sigma_{Max} = \frac{3k f_0 a^2}{b t^2}. \quad (3.6)$$

Viimeinen puuttuva suure yhtälössä on jännityskonsentraatiokerroin k . Kertoimessa otetaan huomioon pilkkoutumisen kannalta oleellinen uran terävyys säde r . Kärjen terävyys säteen kasvu pienentää taivustusjännitystä, kuten hyperbolisessa yhtälössä

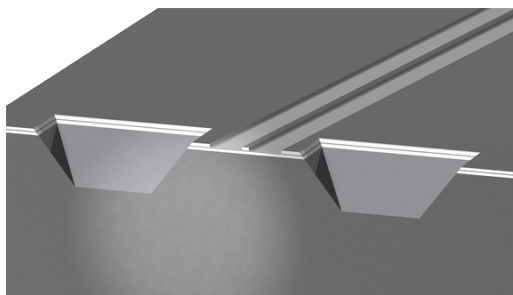
$$k = (0,355 \frac{t-d}{r} + 0,85)^{1/2} + 0,08 \quad (3.7)$$

on esitetty. Sijoittamalla saatava k -arvo yhtälöön 3.6 nähdään terävyys säteen kasvun suoraan pienentävän taivustusjännitystä. [13]

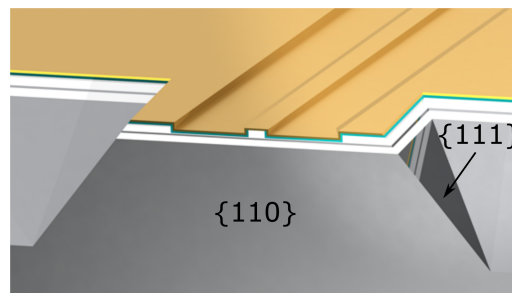
3.3 Kemiallinen tarkastelu: Märkäsyövytys

Tässä työssä kehitettyjen katkaisumerkkien muoto perustuu märkäsyövyttämällä saavutettavaan GaAs:n kidetasojen rajaamiin V-mallisiin uriin. Ura on luonnostaan terävä ja soveltuu hyvin pilkkoutumiseen. Kuvassa 3.3 on mallinnettu saavutettava merkkien muoto. Kuvan 3.3(a) mallissa käytetään kiekkoa, jonka pinnassa on kasvatettu epitaksiaalirakenne. Erona todellisuuteen on myös profiilin epitaksiaali-kerroksen rajoittama merkin muoto substraatin pinnan tasossa. Epitaksiaaliraken-

ne vaikuttaa rajoittavasti märkäsyövytykseen ja merkin muoto jää ovaaliksi pinnan suunnassa.



(a) Malli positiivisen seinämäprofiilin katkaisumerkeistä.



(b) Harjanne ja sitä ympäröivät altaat jäävät katkaisumerkkien väliin muodostuvalle kannakselle, jonka päätyyn muodostuu sileä fasetin pinta. Aktiivialue näkyy kuvassa ohuena vaaleana nauhana. Ohut sininen kerros metallin ja aktiivialueen välissä kuvaa piidioksidia.

Kuva 3.3 Kuvissa on havainnollistettu malleilla katkaisumerkkien rakenne ja sijainti RWG:hen nähden. Mittasuhteet kuvissa vastaavat todellisia mittasuhteita.

Kokeellisesti on havaittu, että mahdollisimman kapea kannas, jonka väliin harjanne jää, on edullinen tasaisen pilkkoutumisen kannalta. Kuvassa 3.3(b) on esitetty malli kokeellisesti saavutetuista kannaksista.

Katkaisumerkkien syövytys aloitetaan ensin kuivasyövyttämällä, jolloin merkin syvyyttä ja kokoa voidaan säätää. Merkin oleellisin osa, eli V-ura, saadaan aikaan märkäsyövyttämällä. Galliumarsenidia voidaan kemiallisesti syövyttää useilla eri liuoksilla ja liuosten seossuhteiden variaatioilla. [4]

Valitusta liuoksesta riippuen syöpyminen voi olla joko isotrooppista tai anisotrooppista. Isotrooppisella syövytyksellä tarkoitetaan tapausta, jossa materiaali syöpyy tasaisesti joka suunnasta kidesuunnista riippumatta. Tämä ei kuitenkaan ole toimiva ratkaisu katkaisumerkkien kannalta. Anisotrooppisella syövytyksellä puolestaan saavutetaan haluttu kidetasoihin rajautuva syövytys. Kuten aikaisemmin jo mainittiin, tämä perustuu eri kidesuuntien erilaisiin syöpymisnopeuksiin. Lisäksi muotoon pystytään esimerkiksi GaAs:n tapauksessa vaikuttamaan merkkien orientaatiolla johtuen gallium- ja arseenirikkaiden pintojen erilaisista syöpymisnopeuksista. [4, 18, 31]

Työssä käytettävät GaAs-kiekot ovat (100)-kiekkoja, eli (100)-kidetaso on kiekon

pinnan suuntainen. Tämän seurauksena syöpyvät katkaisumerkkiurat rajoittuvat $\{111\}$ -tasojen mukaan ja kuvassa 3.3 esitetyt fasetit ovat $\{110\}$ -suuntiin. [4, 31]

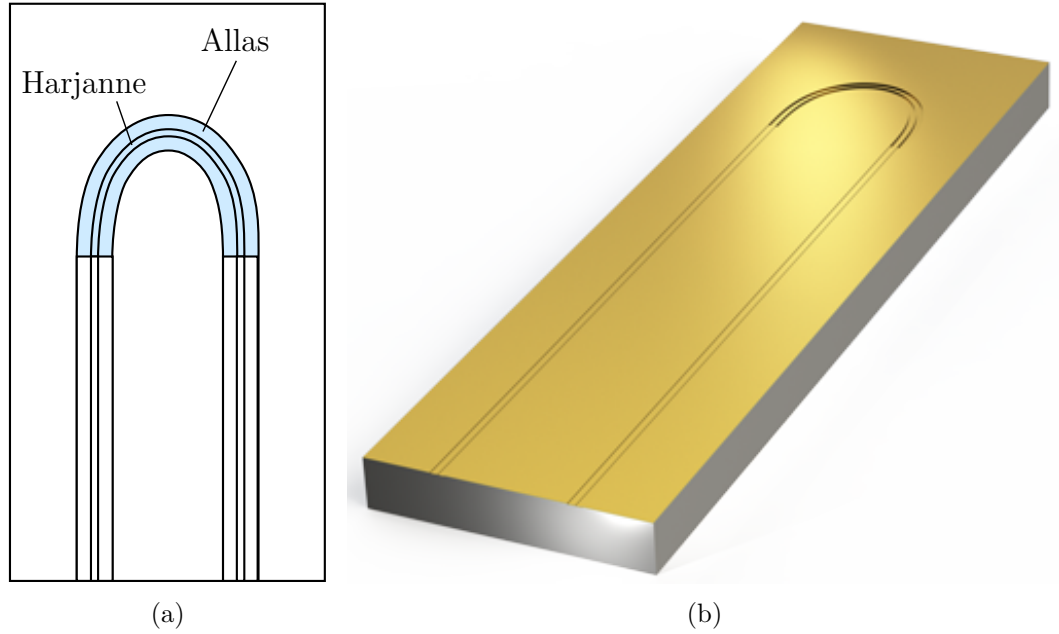
Perustuen aikaisempaan kokemukseen ja kirjallisuuteen [4, 18, 31] järkevä liuos halutunlaisen profilin saavuttamiseksi on $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$. Liuos toimii siten, että ensin vetyperoksidi hapettaa puolijohteen pinnan, jonka jälkeen rikkihappo poistaa syntyneen oksidin ja paljastaa samalla uuden hapetettavan kerroksen. Veden määrää ja muuten seossuhdetta säätämällä voidaan vaikuttaa liuoksen syövytysnopeuteen ja saavutettavan profilin muotoon. Seossuhde 1:8:1 on varsin yleinen ja toimii lähtökohtana myös tässä työssä.[4]

4. OPTINEN PUOLIOHDEVAHVISTIN EULERIN KÄYRÄN MUOTOISELLA AALTOJOHTEELLA

Tässä luvussa esitellään SOA-sovellus, jonka tarkoituksena on mahdollistaa SOA-sirun hyvä intergratio ja pieni pakkauskoko VTT:n kehittämille SOI-alustoille [3, 8, 10] käyttämällä U-mutkaista aaltojohdekanavaa. U:n muotoisen aaltojohdekanavan tavoitteena on tuoda signaalin sisään- ja ulostuloväylät komponentin samalle reunalle, jolloin signaalin kytkeminen komponentin ja muun systeemin välillä helppottuu. Lisäetuna on, että aaltojohdekanavan taivuttamisella saadaan lyhennettyä komponentin pituutta ja tiivistettyä koko systeemin pakkausta. Kuvassa 4.1(a) on mallinnettu kehitettävä siru U:n muotoisella RWG:llä. Esiteltävä komponentti itsessään ei tässä kehitystyön vaiheessa suoraan sovellu käytettäväksi SOA:na, vaan vaatii lisäksi aaltojohdekanavaan nähden vinon fasettipinnan ja heijastuksenestopinnoitteen. Työssä esitettävissä tuloksissa keskitytäänkin komponentin toimintaan laserdiodina.

Haasteena mutkien toteutuksessa ovat mutkahäviöt. Valon perusluonteeseen kuuluu, että se kulkee suoraan eli optisesti lyhintä reittiä. Jyrkkä käänös aaltojohteessa asettaa haasteita käänöksen toteuttavalle rakenteelle. Aaltojohteiden toiminta perustuu kokonaisheijastukseen, jolloin erityistä huomiota on kiinnitettävä rajapintaan valoa johtavan ja ympäröivän materiaalin välillä. Oletettavaa on, että tämän rajapinnan tulee olla mahdollisimman tasainen parhaan heijastuvuuden ja pienten häviöiden takaamiseksi. [16, 20] Suurempi ongelma kuitenkin lienee mutkan taivutussäde. Aaltojohteen taivutussäteen pienentyessä riittävästi vaikeutuu valon kulkeminen aaltojohteessa mutkahäviöiden lisääntyessä. [5, 16]

Mutkan geometriaa ja taivutussädettä muokkaamalla voidaan pyrkiä pitämään valo aaltojohteessa. VTT:llä on tehty teoreettisia mallinnuksia ja kokeellisia testejä mutkille [9] hyödyntämällä Euler-spiraalien teoriaa (toiselta nimeltä Cornu-spiraali). [7, 24] VTT:n tutkimuksessa on tarkasteltu sekä L- että U-muotoisia taivutettuja piiaaltojohdekanavia [9, 10]. Tässä työssä tarkastellaan uutena lähestymistapana Euler-



Kuva 4.1 (a) Periaatepiirros Euler-sirusta, jossa RWG on taivutettu U-mutkalle. Sini-sellä kuvaan on merkitty mutka-alue, jossa allas on syövytetty koko epitaksiaalikerroksesta lävitse noin $3,5\text{--}4\text{ }\mu\text{m}$ syvyyteen. Suoralla osuudella altaan syvyys on noin $1,1\text{ }\mu\text{m}$ siten, että kvanttikaivoa ympäröivä aaltojohde jää ehjäksi. (b) Tietokoneella mallinnettu Euler-siru U:n muotoisella RWG:llä. Siru on piirretty oikeaa komponenttia vastaavissa mittasuhteissa, joskin tarkat mitat saattavat poiketa todellisista. Kuvassa mallin pituus on $2000\text{ }\mu\text{m}$, leveys $600\text{ }\mu\text{m}$, paksuus $110\text{ }\mu\text{m}$ ja altaan leveys $26\text{ }\mu\text{m}$. Mutkan minimisäde on $64\text{ }\mu\text{m}$.

mutkien käyttöä GaAs-pohjaisilla materiaaleilla. Työssä käytetyt materiaalit ovat 1300 nm GaAs/AlGaAs rakenteita GaInNAsSb-kaksoiskvanttikaivoilla [14]

4.1 Euler-spiraali ja mutkan rakenne SOA-komponenteissa

Seuraavaksi esitellään Euler-mutkien tarkempi matemaattinen muoto. Euler-spiraalit, jotka kirjallisuudessa yleisesti myös tunnetaan Cornu-spiraaleina, ovat spiraaleja, joiden taivutussäde muuttuu lineaarisesti kaaren pituuden funktiona. Spiraalit perustuvat Fresnel'n integraaleihin [7, 24]

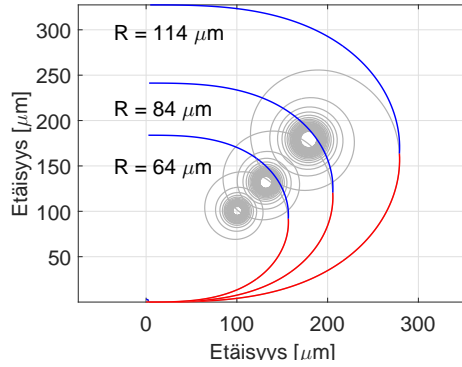
$$\begin{cases} C(u) = \int_0^u \cos \frac{1}{2} \pi t^2 dt \\ S(u) = \int_0^u \sin \frac{1}{2} \pi t^2 dt. \end{cases} \quad (4.1)$$

Kun nämä yhtälöt piirretään tarvittaessa kertoimella a skaalattuna yhtälöiden [24]

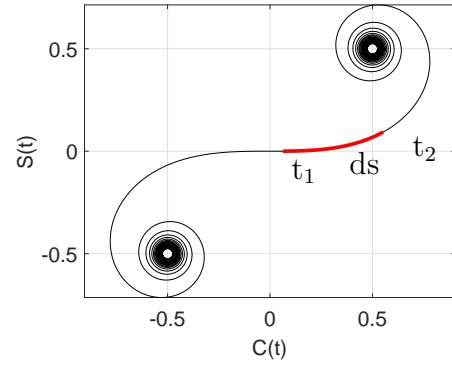
$$\begin{cases} x(t) = aC(t) \\ y(t) = aS(t) \end{cases} \quad (4.2)$$

mukaan saadaan lopputuloksena kuvassa 4.2(b) esitetyn mukainen Euler-spiraali. Kuvan spiraalin skaalauksessa käytetään kerrointa $a = 1$. Spiraalin kaaren pituus ds jollakin välillä $dt = t_2 - t_1$ voidaan laskea yhtälöllä [24]

$$ds = a dt. \quad (4.3)$$



(a) Euler-mutka kolmella eri mutkan minimisäteellä: $R = 64, 84$ ja $114 \mu m$. Punaisella piirrettynä on suoraan harmaalla piirretyn Cornu-spiraalin muoto. Sininen puolisko on peilattu punaisesta viivasta.



(b) Cornu-spiraali peilattuna origon suhteen. x- ja y-akseleina toimivat Fresnel'n integraalin arvot $C(t)$ ja $S(t)$. Punainen viiva esittää satunnaista etäisyyttä ds , jonka alku- ja loppupisteet t_1 ja t_2 ovat.

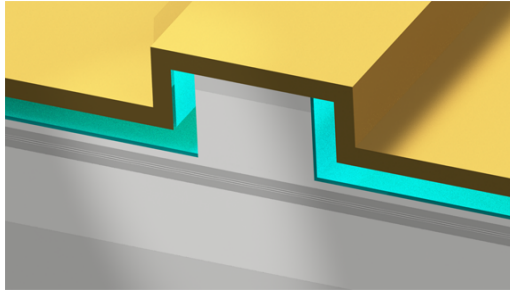
Kuva 4.2 Euler-mutkan muodostuminen Cornu-spiraalin avulla.

Kuvassa 4.2(b) spiraaliin on merkitty punaisella esimerkki kaaren osasta ds . Spiraalin kaartuvuussäde R pisteessä t saadaan puolestaan yhtälöstä [24]

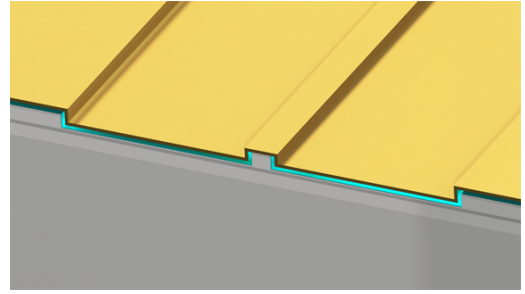
$$R = \frac{a}{\pi t}. \quad (4.4)$$

Kuvassa 4.2 esitellään työssä käytetty mutka kolmella eri minimikäätösäteiden arvolla: $64, 84$ ja $114 \mu m$. Muissa yhteyksissä Fresnel'n integraaleja voidaan käyttää

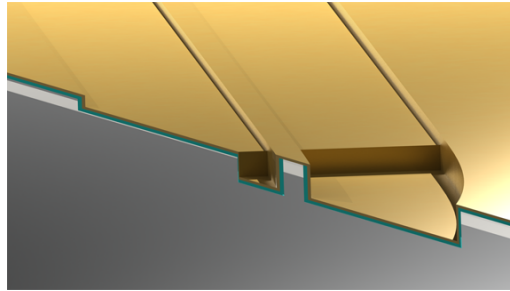
esimerkiksi Fresnel'n diffraktiokuvioiden tarkastelussa. Euler-spiraalia puolestaan hyödynnetään esimerkiksi rautateiden systemiteknikassa.



(a) Mallinnus Euler-SOA -sirun harjanteesta. Vastaava rakenne löytyy myös katkaisumerkkisiruista. Kuvassa näkyy epitaksiaalirakenne harmaan eri sävyissä. Kerrosten kokonaispaksuus on noin 2500 nm. Sininen kerros kuvaa 300 nm paksua piinitridikerrosta. Päälimmäinen kerros on p-kontaktimetalli.



(b) Harjanteen ja altaan alue. Epitaksiaalirakenteen ja pintakerrosten mittasuhteet ovat hahmotettavissa tästä kuvasta. Koko allasrakenteen leveys on noin 25 μm .



(c) Poikkileikkauskuva Euler-SOA sirusta mutkan alusta. Kuvassa nähdään mutkan ja suorien osuuksien topografia ja pinnan eriste- ja metallikerrostumien jakautuminen. Vaaleanharmaa kerros puolijohteessa on aktiivialueen yläpuolinen kerros.

Kuva 4.3 Kuvissa on tietokonemallin avulla esitelty Euler-SOA -komponentin RWG-alueen rakenne. Mittasuhteet kuvissa ovat vastaavia kuin todellisissa siruissa.

Kuvasta 4.1 nähdään Euler-sirun perusrakenne. U-mutkalle taivutettu RWG syövytetään suorilla osuuksilla noin 1,1 μm syvyyteen siten, että syövytys loppuu juuri ennen ensimmäistä aaltojohdekerrosta, kuten kuvista 4.3(a) ja 4.3(b) voidaan havaita. Kuvissa sinisellä on esitetty eristävä, 300 nm SiN_x -kerros virransyötön rajoittamiseksi. Mutkassa allas syövytetään koko epitaksiaalirakenteesta lävitse noin 3,5-4 μm syvyyteen. Tämä muodostaa mutkan ja suorien osuuksien välille askelman, joka on esitelty tarkemmin kuvissa 4.3(c) ja 4.6. Askelman merkitys sirun toiminnalle tul-

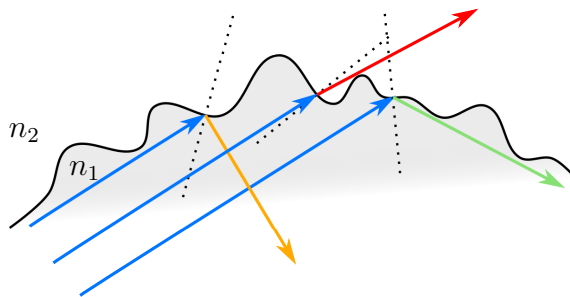
laan tarkemmin käsittelemään myöhemmin.

4.2 Mutkahäviöt

Kuten aiemmin jo todettiin, aaltojohteen kaartumisen tuottamat mutkahäviöt ovat merkittävä ongelma. Mutkan itsensä aiheuttamien häviöiden lisäksi työssä tarkasteltavien komponenttien rakenteeseen liittyy myös muita mahdollisia häviöiden lähteitä. Seuraavaksi tarkastellaankin lähemmin häviöiden lähteitä ja johdetaan lauseke mutkahäviöiden numeeriseksi arvioimiseksi.

4.2.1 Häviötyypit

Rafizadeh [26] luokittelee rengasresonaattoreissa esiintyvät häviöt neljään luokkaan: sironta sivuseinämien epämuodostumista α_S , absorptio substraattiin α_L , muotojen yhteensopimattomuudesta johtuvat kytkentähäviöt α_C ja mutkan kääntösäteiden aiheuttamat häviöt α_B . Suorille RWG-komponenteille voidaan tämä jaottelu muotoilla siten, että sisäiset häviöt tällä merkintätavalla ovat $\alpha_i = \alpha_S + \alpha_L$ ja peilihäviöitä vastaa $\alpha_m = \alpha_C$. Seuraavassa osuudessa mutkakomponenttien häviöitä käsitellään siten, että suoran osuuden ja mutkan sisäiset häviöt oletetaan yhtä suuriksi. Cherchi et al. [8] olettavat sirontahäviöiden olevan yhtä suuret mutkassa ja suorilla osuuksilla. Kuvassa 4.4 havainnollistetaan sironnan hajauttavaa vaikutusta etenevän taso-aallon muodolle sekä suorille että mutkaosuuksille. Tulevassa käsittelyssä mutkahäviöiden arviolle mukaan lasketaan kuitenkin kaikki mahdolliset häviölähteet, myös mahdollinen kasvu sironnassa. Merkitään tätä lisätermiä $\alpha_{S,b}$.



Kuva 4.4 Yksinkertaistettu havainnollistus sädemallin avulla valon sironnasta epätasaisella pinnalla. Pinnan epätasaisuus aiheuttaa sirontahäviöitä valon heijastuessa aaltorintaman kulkusuunnasta poikkeaviin suuntiin.

Lisäksi harjannetta ympäröivän altaan syvyysvaihtelun tuottama muutos kanavan efektiivisessä taitekertoimessa on mahdollinen häviöiden lähde muodon kytkeytyessä rajapinnan ylitse. Merkitään tätä kytkevähäviötä $\alpha_{C,b}$. Lopuksi ovat mutkan muodon aiheuttamat häviöt, joita merkitään α_B niiden erottamiseksi kokonaismutkahäviöistä α_b . Substraatin absorptio α_L oletetaan kuuluvan sisäisiin häviöihin. Näin ollen mutkahäviöille arvioksi voidaan esittää jako

$$\alpha_b = \alpha_{S,b} + \alpha_{C,b} + \alpha_B. \quad (4.5)$$

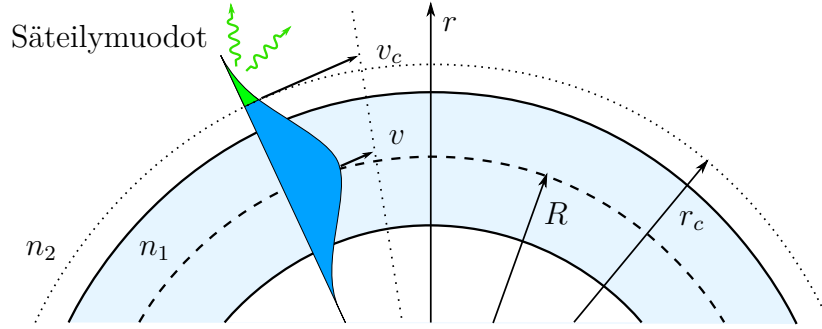
Mutkahäviöiden α_B syntyä voidaan havainnollistaa kuvan 4.5 tapaan. Ajateltaessa aaltojohteessa (taitekerroin n_1) etenevän muodon aaltorintaman olevan nopeudella v etenevä tasoaalto havaitaan, että mutkan ulkoreunalla aalto joutuu kulkemaan muita osia pidemmän matkan. Olkoon tässä v aaltorintaman nopeus mutkassa säteellä R_b . Säilyttääkseen muotonsa aallon on ulkoreunalla edettävä siis nopeammin kuin keskellä. Saavutettaessa kriittinen etäisyys r_c mutkan keskipisteestä joutuisi valo kulkemaan yli c/n_2 nopeudella, mikä on mahdotonta. Tämän seurauksena osa muodosta vuotaa ympäröivään vaippaan (taitekerroin n_2) niin kutsuttuina säteilymuotoina. Tilannetta voidaan kuvata lausekkeella

$$v_c = \frac{c}{n_2} = \frac{c}{n_{eff}} \left(1 + \frac{r_c}{R_b}\right), \quad (4.6)$$

josta kriittinen etäisyys r_c voidaan ratkaista.[38]

Lisäksi taivutussäteiden saavuttaessa tietyn minimiarvon kokevat aaltojohteessa kulkeva muoto kulkusuunnan muutoksen häiriönä ja alkaa kytkeytyä korkeamman kertaluvun muotoihin (eng. higher order modes, HOM). Tämän puolestaan johtaa häviöiden syntyyn mutkassa. Vastaava ilmiö tapahtuu toisin päin muotojen kytkeytyessä takaisin perusmuotoon saavuttaessa suoralle aaltojohdeosuudelle. [9]

Koko kaviteetin matkalla optista kenttää ohjaavan RWG:n muoto muuttuu useasti. Mutkan tuoman lateraalisen muutoksen lisäksi mutkan alku- ja loppupäissä altaan syvyys muuttuu muodostaen askelman. Tällöin luonnollisesti myös optisen kentän kokema efektiivinen taitekerroin muuttuu. Kentän kytkeytyminen kynnyksen ylitse on todennäköinen häviöiden lähde. Harjanteen muodon muutoksen aiheuttamaa muutosta optisessa kentässä on havainnollistettu periaatepiirroksessa 4.6(c). Mata-



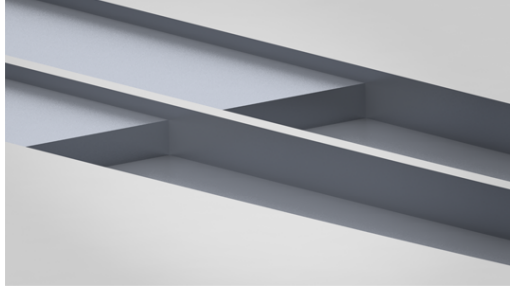
Kuva 4.5 Havainnollistus aaltojohteen kaartumisen tuottamista häviöistä. Häviöt syntyvät, kun etenevästä muodosta kytkeytyy energiaa säteilymuotoihin etäisyyden kasvaessa liian suureksi mutkan keskipisteestä, jotta muoto pystyisi säilyttämään muotoaan. Muodon säilyttäminen vaatisi valon kulkevan ylitse nopeudella $v_c = c/n_2$, mikä on mahdotonta.

la allas RWG:n suorilla osuuksilla ulottuu vain aaltojohdekerroksen ylläpuoliselle alueella jättäen aktiivialueen kokonaiseksi maksimoiden vahvistavan alueen. Tässä tapauksessa kentän muotoon vaikuttaa harjanne rajaavana tekijänä. Tilanne muuttuu syvään syövytetyillä alueilla, jolloin harjanne rajaa symmetrisesti optisen kentän sisäänsä. Tämän seurauksena muodon on muutettava muotoaan suoran osuuden ja mutka-alueen rajapinnassa. Rajapintaan ja kytkeytymishäviöihin liitännäisenä häviöiden ja häiriöiden mahdollisena lähteenä ovat myös takaisinheijastukset rajapinnasta.

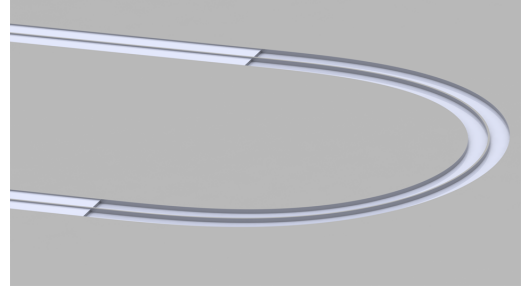
Mutkan alueella edellä käsiteltyjä häviöitä aiheutuu mutkan muodon ja seinämän karheuden seurauksena. Tämän lisäksi mutkahäviöitä arvioitaessa on otettava huomioon aktiivialueen lateraalisessa muodossa mutkassa ja tätä myöten rakenteen vahvistavissa ominaisuuksissa. Siinä missä suorat alueet toimivat vahvistavina (merkitään tässä muotovahvistus $\langle g_s \rangle$) on vahvistuksen käyttäytyminen mutkassa (merkitään tässä $\langle g_b \rangle$) epäselvää kentän rajauskertoimen Γ erilaisuuden johdosta. Vahvistuksen on oltava mutkassa $\langle g_b \rangle \leq \langle g_s \rangle$, jolloin todennäköisesti pätee $\langle g_b \rangle < \langle g_s \rangle$. Mahdollista on myös, että mutka toimii kauttaaltaan häviöllisenä, jolloin $\langle g_b \rangle < 0$ tai on passiivinen, jolloin $\langle g_b \rangle = 0$. Toisaalta laskujen yksinkertaistamiseksi voidaan vaihtoehtoisesti lähteä myös oletuksesta $\langle g_b \rangle \approx \langle g_s \rangle$.

4.2.2 Mutkahäviöiden laskennallinen tarkastelu

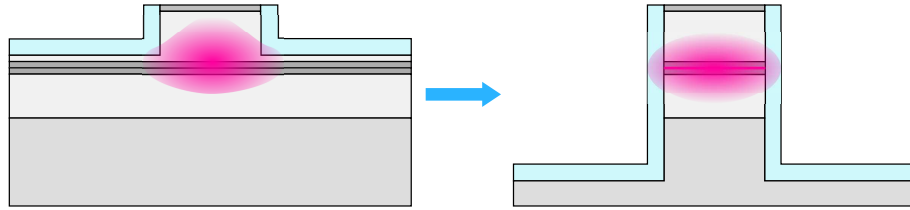
Seuraavaksi johdetaan lauseke mutkahäviöiden numeeriseksi arvioimiseksi. Esitetty lauseke on yksinkertaistettu arvio ja vaatii lisätarkastelua suuremman tarkkuuden



(a) Malli Euler-SOA -sirun altaan syvyyden muutoksesta mutkan siirryttäessä suoralta RWG:ltä mutkaan.



(b) Mallista nähdään mutkan alue kokonaisuudessaan altaan syvyyssvaihtelun kanssa.



(c) Harjanteen muodon muuttuessa optisen kentän muoto muuttuu myös. Tämä todennäköisesti aiheuttaa kytketymishäviöitä. Vasemmalla matala harjanne, jossa allas kulkee aktiivialueen yläpuolella. Oikealla harjanteen syvä profiili mutka-alueella. Punaisella merkityt optisen kentän muodot ovat karkeita hahmotelmia tilanteen havainnollistamiseksi.

Kuva 4.6 Optisen kentän ohjaamiseksi mutkan lävitse harjannetta ympäröivä allas on syövytetty aktiivialueen lävitse. Tämä aiheuttaa askelman suorien osuuksien ja mutkan välillä johtaen mahdollisiin kytkentähäviöihin.

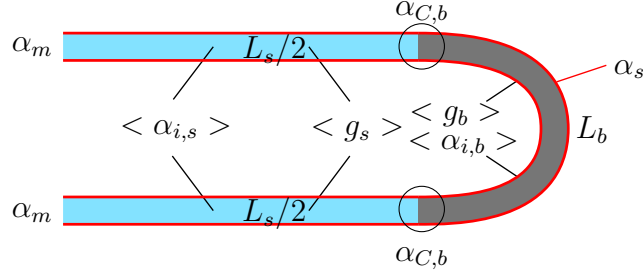
saavuttamiseksi. Tässä työssä tarkasteltujen komponenttien mutkahäviöiden α_b arvioimiseksi otettiin käyttöön aiemmin tarkastellut Coldrenin [11] esittämät yhtälöt suorien laserdioiden häviöiden ja vahvistuksen laskemiseksi.

Yksinkertaisen mallin luomiseksi lähdettiin olettamuksesta $\langle g_b \rangle \approx \langle g_s \rangle$. Seuraamalla Coldrenin [11] esittämää johtoa (2. painos, s. 55-63) ja muuttamalla tarpeellisia osia saadaan komponentin vahvistavien osien ja häviöiden välille yhtälö (2.7)

$$\begin{aligned} \Gamma_{xy,s} g_{th,s} L_s + \Gamma_{xy,b} g_{th,b} L_b &= \alpha_{i,s} L_s + \alpha_{i,b} L_b + \alpha_b L_b + \ln\left(\frac{1}{R}\right) \\ &= \alpha_i (L_s + L_b) + \alpha_b L_b + \ln\left(\frac{1}{R}\right) \end{aligned} \quad (4.7)$$

olettaen sisäisten häviöiden $\alpha_{i,s}$ ja $\alpha_{i,b}$ olevan samat suoralla ja mutkassa. Merkin-

nöissä mutkan ominaisuuksiin viitataan alaindeksillä b ja suoriin osuuksiin merkinällä s . Komponentin eri vahvistus- ja häviöalueet on eritelty kuvassa 4.7.



Kuva 4.7 Havainnollistus Euler-SOA:n RWG:n jakautumisesta alueisiin, joilla häviöiden ja vahvistuksen arvot vaihtelevat.

Yhtälö (4.7) jaetaan koko kaviteetin pituudella $L = L_s + L_b$

$$\Gamma_{xy,s} g_{th,s} \frac{L_s}{L} + \Gamma_{xy,b} g_{th,b} \frac{L_b}{L} = \frac{\alpha_i L + \alpha_b L_b}{L} + \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right). \quad (4.8)$$

Olettaen muotovahvistuksen vakioksi koko mutkassa päästään lausekkeeseen

$$\Gamma_{xy} g_{th} \frac{L_s + L_b}{L} = \frac{\alpha_i L + \alpha_b L_b}{L} + \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right), \quad (4.9)$$

missä pituuksien suhde on $(L_s + L_b)/L = 1 \approx \Gamma_z$, joka on pitkittäinen rajauserroin. Kertomalla lateraalinen rajauserroin pitkittäisellä kertoimella saadaan kokonaisrajauserroin $\Gamma_{xy} \Gamma_z = \Gamma$. Tästä seuraa myös, että sisäiset häviöt α_i voidaan merkitä muodolle muodossa $\langle \alpha_i \rangle$, jolloin saadaan lauseke

$$\Gamma g_{th} = \langle \alpha_i \rangle + \langle \alpha_b \rangle + \alpha_m. \quad (4.10)$$

Lausekkeen (2.6) mukaisesti α_m vastaa kaviteetin peilihäviöitä.

Yhtälöön (2.7) verrattuna yhtälöön (4.10) on lisätty yksi uusi termi mutkahäviöille: α_b . Lisäämällä tämän termin lausekkeeseen (2.1) saadaan differentiaaliselle kvanttiyhötysuhteelle yhtälö

$$\eta_d = \frac{\eta_i \alpha_m}{< \alpha_i > + < \alpha_b > + \alpha_m}. \quad (4.11)$$

Merkitimällä PI-käyrän kulmakerrointa (dP_0/dI) merkillä η_s ja yhdistämällä lauseke (4.11) lausekkeisiin (2.2) ja (2.3) voidaan kirjoittaa

$$\eta_d = \frac{q}{h\nu} \eta_s = \frac{\eta_i \alpha_m}{< \alpha_i > + < \alpha_b > + \alpha_m}. \quad (4.12)$$

Tästä puolestaan voidaan kirjoittaa lauseke mutkahäviöille PI-käyrän kulmakertoimen funktiona

$$< \alpha_b > = \frac{\eta_i \alpha_m h\nu}{\eta_s q} - < \alpha_i > - \alpha_m. \quad (4.13)$$

Laskettaessa mutkahäviöitä mittaustuloksista käytetään suoran kaviteetin avulla määritettyjä arvoja sisäisille häviöille ja sisäiselle kvanttihyötysuhteelle. Peilihäviöiden laskemiseen käytetään koko kaviteetin pituutta L . Kokonaisuutena edellä esitetyn käsittelyn ja lausekkeen (4.13) tarkoituksena on esittää kaikki mutkaan liittyvät häviöt yhdessä termissä mukaan lukien säteilyhäviöt, kytkeytymishäviöt ja mahdolliset mutkan vahvistamat sirontahäviöt sekä muut mahdolliset identifioimattomat häviöiden lähteet.

5. KOMPONENTTIEN KEHITYSTYÖ

Tässä luvussa käydään lävitse sekä katkaisumerkkisirujen, että Euler-SOA -sirujen kehitystyön vaiheet. Alkuun esitellään katkaisumerkkien kehitys ja vaikutus GaAs-kiekon pilkkoutumiseen. Tämän jälkeen esitellään katkaisumerkki-SOA -sirujen viimeisin valmistusprosessi vaihe vaiheelta. Tätä seuraavassa osiossa siirrytään käsittelemään Euler-SOA -sirujen kehitystä. Ensimmäiseksi käydään lävitse valmistusprosessin kehitystyötä, sen aikana ilmenneitä ongelmia ja tehdyn kehitystyön aikana löytyneitä ratkaisuja tai havaintoja. Lopuksi tarkastellaan valmistusprosessia kokonaisuutena, joka perusrungoltaan on vastaava kuin katkaisumerkki-SOA -sirujen kanssa käytetty prosessi.

5.1 Katkaisumerkkien kehitys

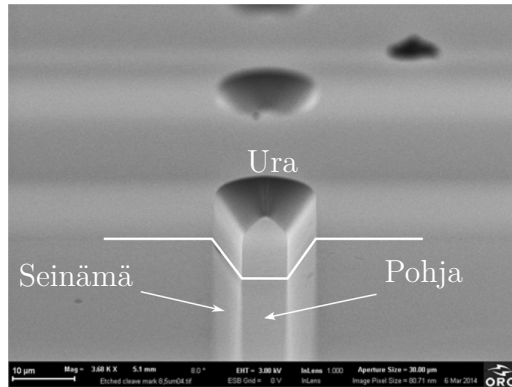
Tässä osiossa esitellään katkaisumerkkien kehitystyö. Aluksi käsitellään merkeille tehtyt kuivasyövytystestit, jonka jälkeen siirrytään märkäsyövytyksen tarkasteluun. Lopuksi käydään lävitse kehitettyjen merkkien vaikutus GaAs-kiekon pilkkoutumiseen.

5.1.1 Kuivasyövytystestit

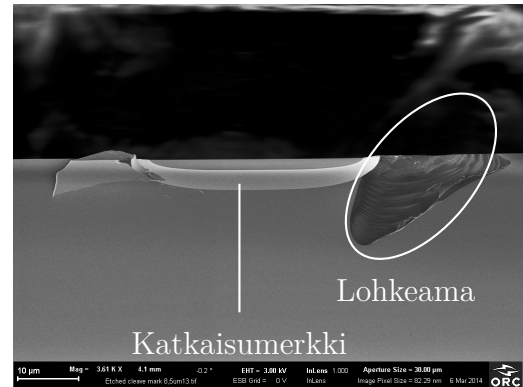
Ensimmäiset testit katkaisumerkkejä varten tehtiin kuivasyövyttämällä ICP-laitteistolla (induktiivisesti kytketty plasma, eng. inductively coupled plasma). Prosessikaasuina käytettiin booritrikloridia (BCl_3) ja argonia (Ar). Testiä varten näytteen pintaan kuvioitiin fotolitografialla katkaisumerkkejä varten suunnitellut kuviot. Syövytysaika oli 23 minuuttia. Profilometrillä (Veeco, Dektak 150 Surface Profiler) mittaamalla syövytetyn uran syvyydeksi saatiin $8,5\text{ }\mu\text{m}$.

Pyyhkäiselektronimikroskooppikuvista (eng. scanning electron microscope, SEM), esitettynä kuvassa 5.1(a), nähdään syövytyksen tuottavan tasapohjaisen, kaltevasinäisen profiilin. Seinän kalteva syövytysprofiili syntyy oletettavasti resistimaskin

vähittäisestä syöpmisestä avauksen reunoilta, jolloin syöpyvää pintaa paljastuu asteittain lisää.



(a) Katkaisumerkki 23 minuutin ICP-kuivasyövytyksen jälkeen kaasuilla BCl_3/Ar . Merkin pohja on tasainen ja seinämät kaltevat johtuen suojaavan resistimaskin vähittäisestä kulumisesta reunoilta.



(b) Pilkkoutumisen synnyttämä lohkeama katkaisumerkin ympäristössä ensimmäisessä testissä.

Kuva 5.1 Ensimmäinen katkaisumerkkitestit. SEM-kuvia katkaisumerkeistä puhtaalle GaAs pinnalle ICP-syövytettynä.

Merkkien syövytyksen jälkeen näyte ohennettiin hiertämällä noin 110 µm paksuiseksi. Tämän jälkeen ohennetulle näytteelle suoritettiin pilkkomistestaus tavoitteena saada näyte pilkkoutumaan katkaisumerkkien avulla. Pilkkomistestaus suoritettiin Dynatexin pilkkojalla (Dynatex GST-150 Scriber). Ensimmäisenä yritettiin saada näyte pilkkoutumaan suoraan pelkkien katkaisumerkkien avulla kohdistamalla merkkilinjaan taivutusjännitys laitteiston valmiilla pilkkomistoiminnolla. Tällä menetelmällä näyte kuitenkin pilkkoutui huonosti.

Pilkkoutumisen avustamiseksi reunaan tehtiin laitteiston timanttipiirtimellä avustava viilto samaan linjaan merkkien kanssa. Merkittävää hyötyä tästä ei kuitenkaan saavutettu. Testin tuloksena merkkien ympäristöön syntyi suuria, kuvassa 5.1(b) esitetyn kaltaisia, lohkeamia.

Erityisesti myöhemmät testit osoittavat, että fasettien laadun kannalta ylimääräisen uran piirtäminen ei tehosta pilkkoutumista, vaan ylimääräinen ura todennäköisesti heikentää tulosta. Osuessaan eri linjaan katkaisumerkkien suhteen pilkkoutumisessa syntyy suuria siirroksia tai lohkeamia katkaisumerkkien uran ulkopuolelle.

Toisessa testissä kokeiltiin uran syvyyden vaikutusta pilkkoutuvuuteen. Testiä var-

ten syövytettiin 13,5 µm, 17,8 µm ja 22,2 µm syvät katkaisumerkinäytteet. Urien profiilit olivat ensimmäisen testin tavoin tylpät. Pilkkomistesteissä todettiin, ettei merkin syvyyden kasvattaminen riitä parantamaan pilkkoutumisen laatua vaan lohkeamat ja hallitsemattomat siirtymät olivat edelleen ongelma. Toisen testin tuloksena todettiin siis tasapohjaisen merkkiprofilin olevan riittämätön laadukkaan fasetin pilkkoutumiseksi. Tätä havaintoa tukee myös teoriaosuudessa esitetty tarkastelu uran terävyys säteen ja merkkiin liittyvän taivutusjännityksen välisestä yhteydestä. Lausekkeista (3.6) ja (3.7) nähdään terävyys säteen pienenemisen kasvattavan taivutusjännitystä ja siten helpottavan pilkkoutumista.

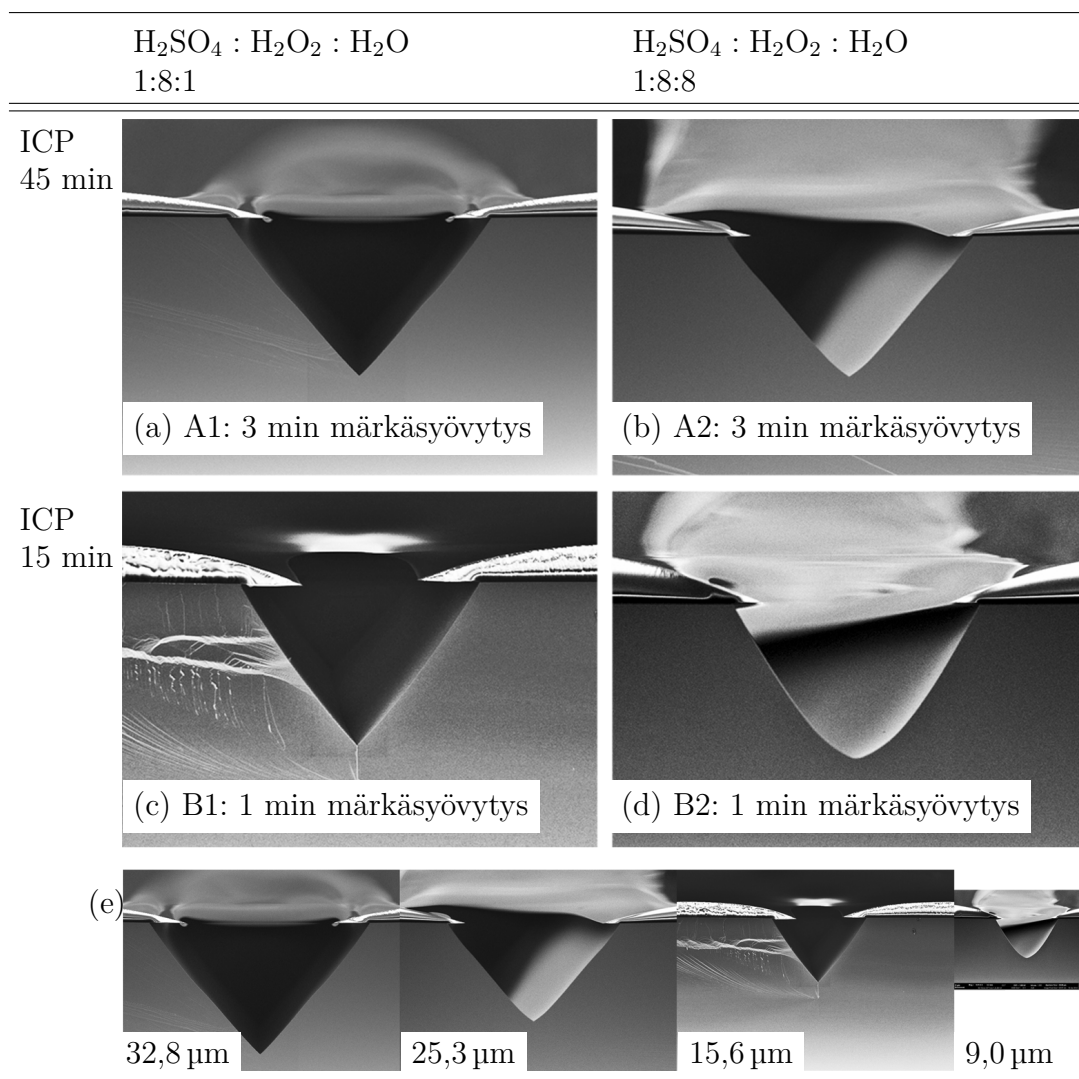
Tämän seurauksena kolmanteen testiin suunniteltiin menetelmä uran teroittamiseksi. Kolmannessa testissä kuivasyövytystä käytettiin luomaan alustava tasapohjainen merkkiura, joka teroitetaan märkäsyövyttämällä. Kuivasyövytyksen tarkoitus on läpäistä pinnan epitaksiaalikerros ja luoda uran alku märkäsyövytystä varten. Kuivasyövytettyä uraa käytetään avustamaan kidetasojen rajoittamaa märkäsyövytystä. Jotta katkaisumerkkiura saadaan teroittumaan mahdollisimman tehokkaasti, on märkäsyövytyksessä käytettävä liuosta, joka syövyttää GaAs-kiderakennetta anisotrooppisesti kidetasojen suuntaisesti. Koska kidetasojen rajaama syövytys kuitenkin myös rajoittaa syövytyssyvyyttä, on näytteen pintaan tarpeen tehdä valmiiksi kuivasyövyttämällä ura, jonka avulla märkäsyövytetyn uran syvyyttä voidaan säätää.

5.1.2 Märkäsyövytystesti

Testeissä käytetyssä märkäsyövytysprosessissa liuoksena käytettiin GaAs:lle yleisesti käytettyä rikkihappo, vetyperoksidi, vesi -seosta $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$. Seosta kokeiltiin kahdella eri seossuhteella kirjallisuudessa esiintyviin tuloksiin [4, 31] ja aikaisempaan kokemukseen perustuen. Seossuhteet olivat 1:8:1 ja 1:8:8.

Neljän näytteen sarjalla testattiin kuiva- ja märkäsyövytyksen vaikutusta syövytysprofiiliin. Näytteistä kahta kuivasyövytettiin ICP:ssä 15 minuuttia ja toista paria 45 minuuttia. Kuivasyövytyksen jälkeen syvyydet olivat arviolta 5 µm ja 15 µm. Tämän jälkeen 5 µm syövytyssyvyyksille tehtiin 1 minuutin ja 15 µm syvyyksille 3 minuutin märkäsyövytykset. Toiselle erisyvyiselle parille käytettiin seossuhdetta 1:8:1 ja toiselle 1:8:8. Testistä saadut urien profiilit ja syvyydet on esitetty kuvassa 5.2.

Kuvan 5.2 d-kohdasta nähdään, että syövytysajat ovat olleet riittämättömät, jolloin syövytyssyvyys on jäänyt matalaksi ja uran profiili teroittumatta. Samoin näyt-



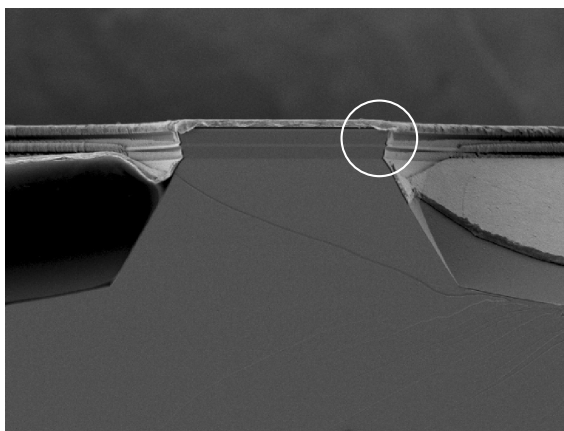
Kuva 5.2 Urien poikkileikkaukset kohtisuoraan pilkkoutumispinnan kanssa. (a) Uran syvyys 32,8 μm (b) Uran syvyys 25,3 μm. Uran muodossa havaittavissa lievää pyöreyttä. (c) Uran syvyys 15,6 μm (d) Uran syvyys 9,0 μm. Syövytysaika on ollut riittämätön ja profiili ei ole täysin terävä. (e) Merkit skaalattu karkeasti toisiinsa nähten oikeisiin mittasuhteisiin. Urien syvyydet on merkitty kuvaan.

teen A2 tapauksessa syövytysaika on ollut riittämätön, kuten nähdään uran pohjan lievästi pyöreästä profilista. Verrattaessa näitä seossuhteella 1:8:8 syövytettyjä näytteitä seossuhteen 1:8:1 näytteisiin on selvää, että suuremman syövytysnopeuden liuos 1:8:1 valitaan merkkien prosessointia varten.

Katsottaessa seossuhteen 1:8:1 liuksella syövytettyjä näytteitä havaitaan, että muuttamalla alustavan kuivasyövytyksen syvyyttä voidaan suoraan vaikuttaa uran syvy-

teen märkäsyövytyksen jälkeen. Verrattaessa näytteitä A1 ja B1, joilla märkäsyövytyksessä käytettiin samaa liuossuhdetta mutta näytteellä A1 kaksi kertaa pidempää kuivasyövytystä, nähdään että vastaavasti märkäsyövytyksen jälkeen näytteen uran syvyys on kaksi kertaa syvempi kuin näytteellä B1. Syvyyserosta huolimatta nähdään, että molempien profilit ovat teroittuneet yhtäläisesti. Valotetut kuviot ennen syövytystä olivat kaikille näytteille samat. Kuvioiden leveys oli 4 μm . Kaikissa testivaiheen näytteissä on käytetty puhdasta GaAs:a ilman kasvatettua rakennetta.

Puhtaalla GaAs:lla tehdyissä testeissä riittävän märkäsyövytyksen jälkeen merkit teroittuivat ylhäältä katsottuna neliskulmaisiksi säännöllisiksi geometrisiksi rakenteiksi. Testiprosesseissa, joissa puolestaan käytettiin epitaksiaalirakenteisia materiaaleja, merkit eivät reunoistaan syöpyneet loppuun vaan jäivät joko pyöreiksi tai ovaaleiksi alkumerkin pituudesta riippuen. Puhtaalle GaAs:lle syövytetyt merkit jäävät epitaksiaalirakenteen merkkejä pienemmiksi. Kuvassa 5.3 on esimerkki rakenteen erilaisesta syöpymisestä. Havaintojen perusteella vaikuttaisi siltä, että siinä missä puhdas GaAs syöpyy anisotrooppisesti kidetasojen ohjaamana, on epitaksiaalirakenteen syöpyminen luonteeltaan enemmän isotrooppista. Tämän vuoksi ICP:llä tehtävän kuivasyövytyksen on syytä läpäistä pinnan rakenne kokonaisuudessa, jotta saavutetaan mahdollisimman tasainen ja syvä ura.



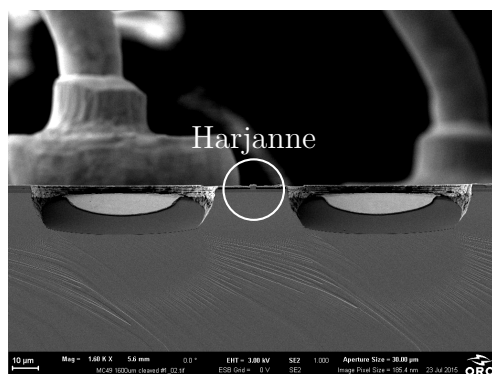
Kuva 5.3 Katkaisumerkkien väliin jäävä kannas. Merkkien reunoilla nähdään epitaksiaalikerroksen vaihtelevan syöpymysnopeuden aiheuttama reunan epätasaisuus. Epitaksiaalikerroksen läsnäolo estää merkin reunojen teroittumisen johtaen merkin ovaaliin muotoon kiekkoa ylhäältä käsin tarkasteltaessa.

5.1.3 Pilkkominen

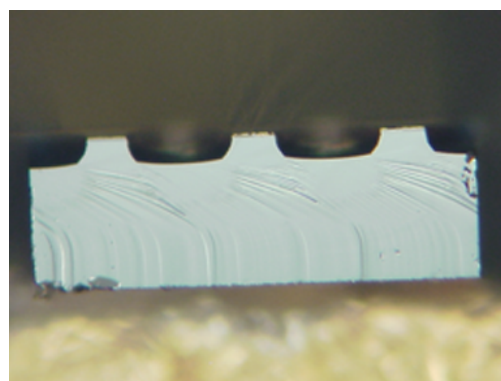
Pitkän syövytysajan vuoksi resistimaskin kestävyys muodostui ongelmaksi. Tätä varten kehitettiin menetelmä kaksinkertaisen resistikerroksen levittämiseksi, jotta riittävä kerrospaksuus syövytystä varten saavutettiin. Ongelmana kahden päällekkäisen kerroksen levittämisessä on alemman resistikerroksen sulaminen toista kerrosta levitettäessä mikäli levitystä ei tehdä oikein. Testien perusteella päädyttiin prosessiin, jossa AZ6632-resisti levitetään alhaisella pyöritysnopeudella 1500 rpm, odotetaan 5 minuuttia liuottimien haihduttamiseksi ja paistetaan matalassa 60 °C lämpötilassa ennen toista kerrosta. Toisen kerroksen levityksen jälkeen näyte paistetaan vielä 5 minuuttia lämpötilassa 100 °C. AZ6632 -kaksoisresistikerroksen syövytysnopeudeksi ICP kuivasyövytyksen (BCl₃/Ar 5/45 sccm, RF 200W / ICP 700 W) aikana arvioitiin kolmen testinäytteen avulla 0,1 µm/min. 45 minuutin syövytysajalla tämä tarkoittaa, että yksin kuivasyövytyksessä resistimaskin on oltava yli 5 µm paksu. Yhdellä resistikerroksella AZ6632-resistiä käytettäessä saavutetaan enimmillään noin 5 µm kerrospaksuus. Tämä puolestaan ei riitä yhdistettyyn pitkään ICP- ja märkäsyövytykseen. Syvempien kuivasyövytettyjen urien tapauksessa on siis syytä käyttää joko paksumpia resistejä tai kaksoiskerrosta. Kaksoisresistikerroksen paksuudeksi saatiin noin 12,5 µm.

Seuraavissa testeissä ja prosesseissa päädyttiin kuitenkin lyhempään 20 minuutin kuivasyövytysaikaan, kun todettiin tällä ajalla saavutettavan merkin syvyyden riittävyys. Huomattava myös on, että vaikka oletettavasti merkin syvyyden kasvataminen edistää pilkkoutumista, kasvavat merkin syvyyden kasvaessa myös merkin mittasuhteet näytteen pinnalla. Tämä puolestaan on haitallinen ominaisuus itse komponenttien rakenteiden ja toiminnallisuuden kannalta. SOA-sirun rakennetta suunniteltaessa on otettava huomioon sekä merkkien riittävä määrä ja periodi että harjanteiden ja allasalueiden sijainti.

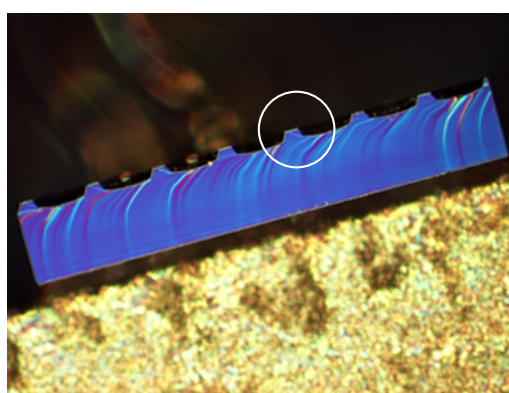
Tähänastiset pilkkomistestit antavat viitteitä siitä, että katkaisumerkkijono pakottaa vähitellen näytteen pilkkoutumaan merkkien määräämän uran suuntaisesti mikäli siirros ei ole liian suuri. Tämä tarkoittaisi sitä, että merkkien välisen kannaksen ollessa riittävän kapea ja rajattu alue, näyte lohkeaa kidetason mukaan ja tarvittava siirros kidetasojen välillä tapahtuu pääasiallisesti merkkien alapuolisella rajoittamattomalla alueella. Näitä siirroksia on havaittavissa kuvissa 5.4(a) ja 5.4(b). Kuten kuvista nähdään, parhaimmillaan pilkkoutuminen tapahtuu siten, että kannaksen alueella ei siirroksia ole SEM-kuvissa havaittavissa olevassa kokoluokassa. Tämä



(a) SEM-kuva kannaksesta, jossa on harjanne keskellä. Kannaksen alue on tasaisesti pilkkoutunut. Siirroslinjoja on runsaasti merkkien alapuolella.



(b) Mikroskooppikuva vastaavasta näytteestä. Siirroket ovat selvästi näkyvissä myös optisellamikroskooppilla.



(c) Mikroskooppikuva fasetista eri prosessista kuin kuvat (a) ja (b). Siirroslinjoja on havaittavissa usean kannaksen alueella.

Kuva 5.4 Fasetteja näytteissä, jotka on pilkottu katkaisumerkkien avulla. Siirroslinjat ovat selvästi näkyvissä sekä SEM- että mikroskooppikuvissa.

luonnollisesti on ideaali tilanne fasetille, joka toimii kaviteettia rajaavana peilinä.

Joissakin testeissä pilkkoutuminen ei kuitenkaan ole ollut yhtä siistiä, vaan siirroksia on osunut myös kannaksen alueelle, kuten kuvan 5.4(c) tapauksessa. Näissä tapauksissa mahdollista on, että katkaisumerkkien kohdistaminen riittävän lähelle kidetasojen suuntaa on epäonnistunut. Toinen mahdollisuus on, että merkkien ja kannasten geometria ei ole ollut näissä tapauksissa otollinen. Jos lähdemme ajatuksesta, että katkaisumerkit mahdollistavat siirtymien muodostumisen muualla kuin kannasten alueella, on syytä tarkastella kannasten leveyttä ja merkkien periodia. Olettamukse-

na on, että mitä kapeampi kannas on sitä pienempi riski siirrosten muodostumiselle sen alueella on. Toisaalta on järkevää myös olettaa, että mikäli katkaisumerkin pituus on suuri, eivät siirrokset pääse syntymään yhtä luonnollisesti vähitellen vaan materiaali lohkeaa väkisin useamman kerroksen matkalta. Tämän perusteella lähdetään siis liikkeelle ajatuksesta, että kannaksen leveys ja katkaisumerkkien periodi pyritään minimoimaan.

Paikallisesti pilkkoutumislinjan kohdalla poikkileikkauspinta-ala pienenee katkaisumerkkien vaikutuksesta. Normaalin timanttikärjellä piirretyn uran syvyys on pieni verrattuna kiekon paksuuteen, noin 2-3 % kiekon paksuudesta, jolloin muutos pilkkoutuvassa alassa on marginaalinen. Katkaisumerkkien tapauksessa uran syvyys on noin 15-25 % kokonaispaksuudesta.

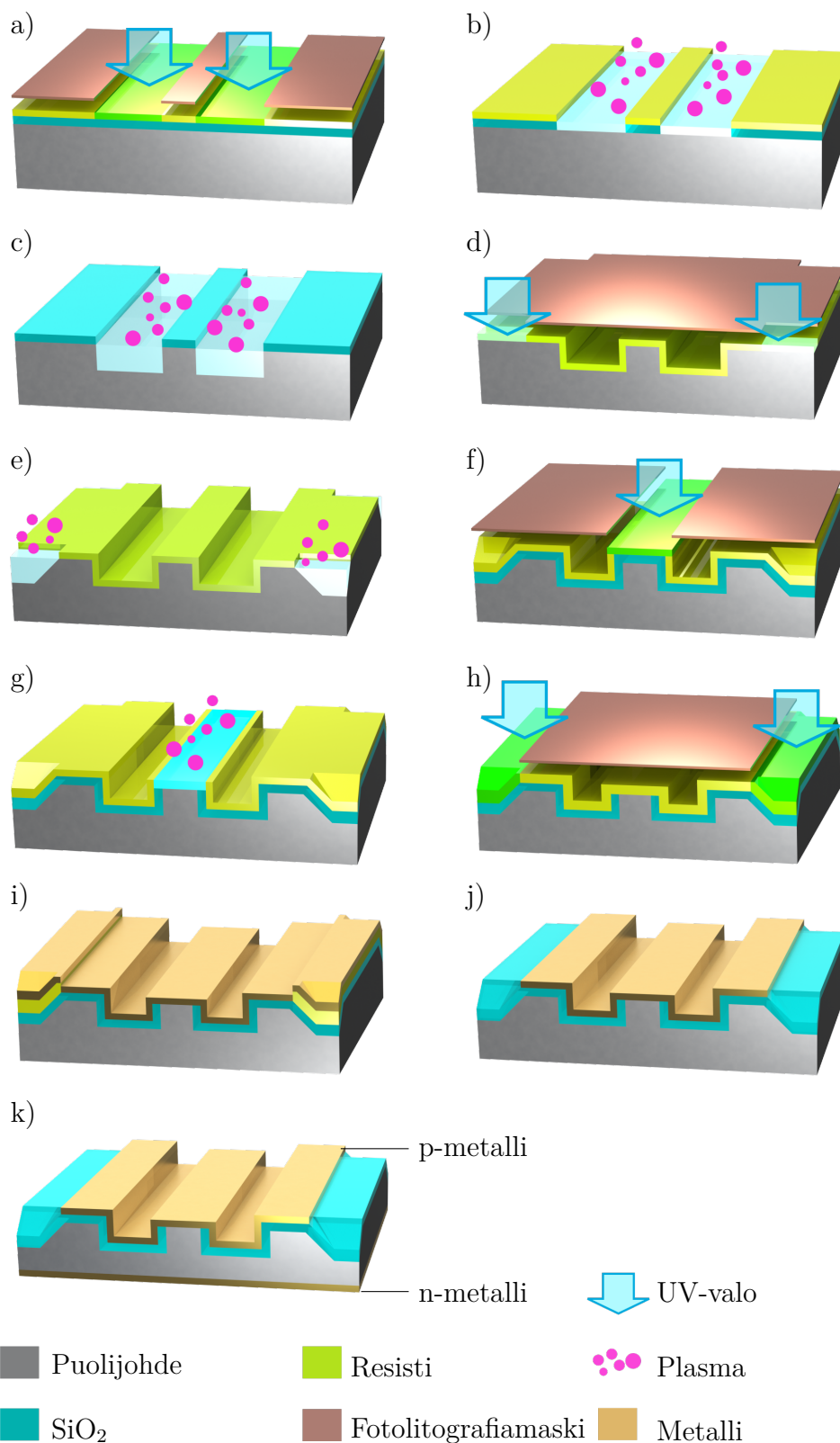
Testien tuloksena ollaan havaittu, että poikkileikkauspinta-alaa pystytään pienentämään leveillä ja syvillä urilla, joita pitkin kiekko pilkkoutuu. Lisäksi oleellisena piirteenä urat ovat teräviä ja profiililtaan V-mallisia. Niissä testitapauksissa, joissa urat eivät syöpyneet riittävän syviksi ja jäivät teroittumatta pohjistaan, sirut eivät joko pilkkoutuneet lainkaan tai pilkkoutuivat vain satunnaisesti.

5.2 Prosessivaiheet

Tässä osiossa esitellään katkaisumerkillisten SOA-komponenttien viimeisin valmistusprosessi vaihe vaiheelta. Prosessi on suunniteltu GaAs-pohjaisille kiekkoille, joille on kasvatettu GaAs/AlGaAs rakenne GaInNAsSb kaksoiskvanttikaivoilla. Esitetty prosessi perustuu pääosin ORC:llä yleisesti käytettyihin prosessointivaiheisiin ja -menetelmiin ja jota on muokattu kehitettävän komponentin tarpeisiin. Prosessin vaiheet on esitetty periaatekuvassa 5.5 ja liitteessä 1 taulukossa 1. Kuvassa mitasuhteet on esitetty vääristyneinä prosessivaiheiden ja komponentin rakenteen selkeyttämiseksi. Prosessi sisältää yhteensä neljä fotolitografia vaihetta, joilla eri kerrokset ja pinnan kuviointi toteutetaan.

5.2.1 Harjanteet

Ensimmäistä litografiavaihetta varten puhtaan kiekon pintaa kasvatetaan 200 nm piidioksidia plasma-aktivoitdulla kemiallisella höyryfaasimenetelmällä (eng. plasma



Kuva 5.5 Katkaisumerkki SOA-komponenttien prosessivaiheet tiivistetysti. (a) Harjanteiden valotus. (b) SiO₂-maskin syövytys RIE:ssä. (c) Harjanteiden syövytys GaAs:iin ICP:ssä. (d) Katkaisumerkkien valotus. (e) Katkaisumerkkien kuiva- ja märkäsyövytys. (f) Avausten valottaminen piinitridiin. (g) Avausten syövytys piinitridiin RIE:ssä. (h) p-metallin kuvion valotus. (i) p-metallin höyrytys. (j) Lift-off, ylimääräisen metallin poistaminen. (k) Näytteen ohennus ja n-metallin höyrytys.

enhanced chemical vapour deposition, PECVD) Oxford Instrumentsin PECVD Plasmalab System 80 Plus -laitteistolla. Tämän jälkeen pintaan höyrytetään heksametyyldisilatsaani (HMDS) kalvo fotoresistin adheesion parantamiseksi piidioksidin pinnalla. Seuraavaksi pintaan levitetään linkoamalla MicroChemicalsin fotoresisti AZ6612. Tässä vaiheessa käytetyn resistikerroksen paksuus on noin $3,4\text{ }\mu\text{m}$. Käytetty fotoresisti on positiivinen resisti, joka tullessaan altistetuksi UV-valolle muuttuu alkaliuoksiin liukenevaksi. Levitetty resistikerros paistetaan lämpölevyllä $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämmössä 1 minuutin ajan liuottimen haihduttamiseksi, jonka jälkeen resisti kuvioidaan valottamalla näyte maskinkohdistimessa UV-valolla erityisen lasisen fotolotografi-maskin lävitse, jossa halutut alueet on suojattu valoa läpäisemättömiksi. UV-valolle altistuneet alueet poistetaan kehittämällä näyte MicroChemicalsin AZ 726 MIF tetrametyyliammoniumhydroksidi (TMAH) -liuoksessa (seuraavissa osioissa käytetään lyhennettä MIF). Lopuksi näyte vielä paistetaan lämpölevyllä 2 minuuttia $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Kuvatut työvaiheet on esitetty kuvassa 5.5(a).

Kuten kuvassa 5.5(b) havainnollistetaan, kuvioidun resistimaskin avulla piidioksidi kuivasyövytetään avatuilta alueilta reaktiivisella ionisyövytyksellä (eng. reactive ion etching, RIE) Oxford Instrumentsin Plasmalab Systems 100 RIE -laitteistolla. Syövyttävän plasman lähdekaasuina käytetään trifluorimetaania (CHF_3) ja argonia 25/25 sccm virtauksilla 30 mTorr paineessa ja RF-tehon ollessa 200 W. Syövytyksen jälkeen suojaava resistikerros poistetaan liuottimella. Liuottimen on sovelluttava plasmasyövytyksen kovettaman resistin poistoon. Tämän jälkeen, kuten kuvassa 5.5(c) havainnollistetaan puolijohteeseen kuivasyövytetään harjanne suojaavan piidioksidimaskin avulla. Syövytys tehdään Oxford Instrumentsin induktiivisesti kytkeytyn plasmalaitteiston Plasmalab System 100 ICP (eng. inductively coupled plasma, ICP) avulla. Syövyttävään plasmaan käytetään piitetrakloridia (SiCl_4) ja argonia virtauksilla 7,5/15 sccm, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa, 3,5 mTorr paineessa, RF-teholla 65 W ja ICP-teholla 300 W. Syövytyksen jälkeen pintaa suojanut piidioksidikerros poistetaan RIE-syövytyksellä prosessilla: CHF_3/O_2 2/30 sccm, 80 mTorr paineella ja 100 W RF-teholla.

5.2.2 Katkaisumerkit

Harjanteen muodostamisen jälkeen puolijohteeseen syövytetään katkaisumerkit yhdistämällä kuiva- ja märkäsyövytystekniikoita. Ensin pintaan levitetään HMDS-kerros ja fotoresisti. Johtuen seuraavista syövytysvaiheista käytetään paksua, noin $5\text{ }\mu\text{m}$, AZ6632 resistikerrosta. Levitetty resistikerros paistetaan lämpölevyllä $110\text{ }^{\circ}\text{C}$

lämmössä 1,5 minuuttia. Tämän jälkeen resisti kuviodaan valottamalla maskinkohdistimessa ja kehittämällä MIF-liuoksella. Tämä vaihe on esitetty kuvassa 5.5 (d). Resisti kovetetaan paistamalla 125 °C lämpötilassa 5 minuuttia.

Paljaat puolijohdealueet syövytetään noin 6,5 µm syvyyteen ICP:llä prosessilla BCl₃ / Ar 5/45 sccm 20 °C lämpötilassa, 10 mTorr paineessa, RF-teholla 200 W ja ICP-teholla 700 W. Kuivasyövytetty ura syövytetään tämän jälkeen H₂SO₄ : H₂O₂ : H₂O 1:8:1 liuoksessa huoneenlämpötilassa (23 °C) ilman sekoitusta. Märkäsyövytystä varten näytteen takapinta suojataan kemikaaleja kestäväällä teipillä. Syövytysaika riippuu valotettujen merkkien koosta ja uran ICP-syövytyksen jälkeisestä syvyydestä. Keskimäärin haluttu terävä merkki profiili saavutetaan 1-2 minuutin syövytyksellä. Merkin syvyydeksi saadaan noin 20 µm profilometrillä mitattuna ilman resistiä. Resisti poistetaan 80 °C lämpöisellä S1165-liuottimella ja tarvittaessa happiplasmalla RIE:ssä. Kuva 5.5(e) havainnollistaa syövytysvaihetta.

5.2.3 Avaus piidioksidiin

Seuraavassa vaiheessa, joka esitellään kuvassa 5.5(f) ja (g) suojataan puolijohteen pinta eristeellä harjanteen pintaa lukuun ottamatta virran sisäänsyötön rajoittamiseksi. Ensimmäisenä pintaan kasvatetaan 160 nm piidioksidikerros PECVD:llä, jonka päälle höyrytetään HMDS-kerros ja levitetään noin 3 µm AZ6632-resistikerros. Näyte paistetaan 2 minuuttia 115 °C lämpötilassa. Aikaisempien vaiheiden tapaan resisti kuviodaan ja paistetaan tämän jälkeen 2 minuuttia 125 °C lämpötilassa.

Resistimaski valotetaan ja kehitetään siten, että ainoastaan harjanteen päällinen osa aukeaa jättäen resistin suojaamaan harjanteen reunoja. Tällöin ainoastaan harjanteen alueen piidioksidi syövytetään pois seuraavassa RIE-syövytyksessä. Tässä vaiheessa käytetään reseptiä CHF₃/Ar 25/25 sccm, 30 mTorr paineessa ja 200 W RF-teholla. Syövytyksen jälkeen resisti poistetaan kuumalla S1165 liuoksella.

5.2.4 p-kontaktimetalli

Piidioksidiin tehtyjen avausten jälkeen näytteen pintaan tehdään metallikontaktit. Tämä vaihe on esitelty kuvassa 5.5(h)-(j). Kontaktialueet kuviodaan edellisten vaiheiden tapaan fotolitografialla. Erona tässä vaiheessa on MicroChemicals in käänteisen lift-off -resistin, AZ5214E, käyttö. Pintaan levitetään HMDS-kerros ja noin 2 µm

paksuinen AZ5214E-kerros ja paistetaan 1 minuutti 100 °C lämpötilassa. AZ5214E-resistin tapauksessa valotetaan ne alueet, jotka halutaan poistaa. Ensimmäisen valotuksen jälkeen näyte paistetaan 2 minuuttia 115 °C lämpötilassa, jotta valotetut alueet saadaan kovettumaan siten, että ne muuttuvat huonosti liukeneviksi ja UV-valolle reagoimattomiksi. Valottamattomat alueet puolestaan käyttäytyvät normaalin positiivisen resistin tavoin ja saadaan poistettua valottamalla koko näyte ja kehittämällä MIF-liuoksessa.

AZ5214E-resisti on tarpeen kontaktimetallien luomisessa erityisen negatiivisen resistin seinämäprofiilin vuoksi. Kontaktit luodaan niin kutsutulla lift-off -prosessilla, jossa metalli höyrystetään resistillä kuvioitun näytteen pintaan. Tämän jälkeen ne alueet, joissa metalli on resistin päällä, poistetaan liuottamalla S1165-liuottimella. Lopputuloksena jäljelle jäävät vain ne alueet, joilla resistiä ei ollut ennen metallin höyrystämistä. Resistin negatiivinen seinämäprofiili puolestaan helpottaa resistin liuottamista pois metallikerroksen alta.

Ennen metallointia paremman kontaktin saavuttamiseksi näytteen pinnan paljaille puolijohdealueille harjanteiden päällä tehdään pinnan oksidien poisto ammoniumhydroksidi-vesi $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}$ 1:10 liuoksessa. Välittömästi tämän jälkeen pintaan höyrystetään metallikerros. Käytetyn materiaalin ollessa yläpuolelta p-seostettu käytetään p-kontaktimetalleina yhdistelmää titaani, platina ja kulta (Ti/Pt/Au). Käytetyt metallikerrosten paksuudet riippuvat aktiivialueen etäisyydestä näytteen pintaan ja paksuudet on laskettava erikseen jokaiselle rakenteelle. Tämä johtuu siitä, että komponentti tullaan yhdistämään p-puoli alaspäin VTT:n kehittämiin SOI-alustoihin. Tällöin aaltojohdekanavan kohdistamiseksi komponentin pystysuuntaisen paksuuden p-puolella näytteen pinnan ja aktiivialueen välillä tulee olla etukäteen määritelty. Paksuuksia laskettaessa on otettava myös huomioon, että näytettä on käännettävä höyrystyksen aikana, jotta harjanteiden seinämät saadaan myös metalloitua. Metallikerroksissa käytetään paksuuksia Ti/Pt/Au 50/50/100 nm.

5.2.5 Puolijohteen ohennus ja n-kontaktimetalli

Prosessin viimeisissä vaiheissa näyte ohennetaan takapinnasta pilkkomisen helpottamiseksi ja takapintaan höyrystetään n-kontaktimetallit, kuten kuvassa 5.5(k) havainnollistetaan. Ohennusta varten näytteen etupuoli suojataan AZ6632 resistillä. Ohennus toteutetaan hiertämällä mekaanisesti puolijohteen pintaa 9 µm raekoon

alumiinioksidiliuoksella. Ohennuksen ajan näyte on kiinnitettynä lasialustaan vahalla. Ohennuksen päätteeksi pinta kiillotetaan Logitechin natriumhypokloriittipohjaisen Chemlox-kiillotusliuoksen kanssa hiertämällä. Lopullinen tavoitepaksuus näytteelle on noin 110 µm.

Ohennuksen jälkeen näyte puhdistetaan vahasta ja resististä liuottimilla. Ennen n-metallien höyrytämistä pinnalle tehdään oksidinpoisto p-metallivaiheen tapaan $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O} 1:10$ liuoksella. Tämän jälkeen takapinnan n-seostettuun pintaan höyrytetään n-metallit nikkeli, kulta, germanium ja kulta Ni/Au/Ge/Au kerrospaksuuksilla 5/5/30/90 nm. Seuraavaksi metallit seostetaan sopivaksi kontaktimetalliseokseksi nopealla lämpökäsittelyllä (eng. rapid thermal anneal, RTA) 370 °C lämpötilassa 60 sekunnin ajan kahden piikiekon välissä lämmön tasaamiseksi näytteellä. Lopuksi pinta käsitellään argonplasmalla ja ylimääräinen kontaktimetallikerros kasvatetaan paremman kontaktin saavuttamiseksi. Metallikerros on samankaltainen kuin yläpinnan metallikerros: Ti/Pt/Au 50/50/100 nm.

5.2.6 Pilkkominen ja liittäminen mittausalustoihin

Valmiista näytteestä pilkotaan katkaisumerkkien avustuksella yksittäisiä siruja kiinnitettäväksi mittausalustoille. Pilkkominen tehdään Dynatexin GST-150 Scriber -pilkkomislaitteistolla. Laitteelle määritellään pilkkoutumispaikoiksi katkaisumerkirivistöjen muodostamat linjat, joihin laite kohdistaa iskun pilkkoen kiekon merkirivistön linjassa. Lopputuloksena on tasainen fasetti muodostuvien tankojen päädyissä. Näistä tangoista pilkotaan erikseen yksittäisiä siruja piirtämällä halutut pilkkoutumislinjat laitteiston timanttikynällä.

Testimittauksia varten saadut sirut paketoidaan mittauksen mahdollistaviin johtaviin alustoihin kiinnittämällä sirut n-puolelta hopeaepoksiliimalla ja langoittamalla sirun p-metallikontakteista kultalangat alustan kontakteihin.

5.3 Euler-mutkien kehitys

Euler-mutkia varten saatiin VTT:ltä parametrit fotoligrafi maskin suunnittelemista varten. Parametrien avulla ensimmäisessä kehitysvaiheessa testattiin suoria ja U-mutkaisia harjanteita. U-mutkilla ulostulo ja sisääntulo ovat samalla puolella. VTT:n simulaatioiden perusteella testattavaksi valittiin kaksi eri harjanteen leveyttä: 1,0 µm ja 1,5 µm.

5.3.1 Alustavat testit mutkien syövyttämiseksi

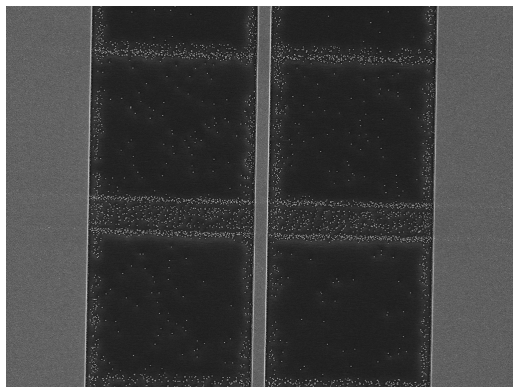
Mutkien valmistusprosessin kehitys aloitettiin testisarjalla, jolla pyrittiin tuottamaan mahdollisimman stabiili prosessi mutkallisten harjanteiden prosessoimiseksi. Lähtökohdaksi testeihin otettiin prosessi, jossa puolijohde syövytetään ICP:llä SiO_2 -maskin avulla. SiO_2 -maski puolestaan toteutetaan metallimaskin avulla RIE:llä syövyttämällä.

Metallimaski tehdään fotolitografialla lift-off -prosessilla. Lift-off -prosessissa käytetään AZ5214E-fotoresistiä kerrospaksuudella $1,6\text{ }\mu\text{m}$. Kehityksen ja paiston jälkeen näytteen pintaan höyrytetään 20 nm nikkeliä suurella höyrystysnopeudella (1 nm/s). Normaalisti käytettyjä höyrystysnopeuksia lähes kymmenen kertaa nopeampi höyrystys otettiin käyttöön tavoitteena mahdollisimman tasainen reuna metallimaskissa harjanteiden seinämiä syövytettäessä. Taustalla tässä on ajatus siitä, että nopea höyrystys metallipinnan klusterikokoa kasvattamalla olisi parempi seinämien tasaisuuden saavuttamiseksi [6]. Lift-off -vaiheen jälkeen metallimaskin avulla syövytetään RIE:llä (CHF_3/Ar 25/25 sccm, RF = 200 W, $p = 30\text{ mtorr}$) SiO_2 -kalvo, jonka jälkeen nikkeli poistetaan. Puolijohde syövytetään SiO_2 -maskin avulla ICP:llä reseptillä ($\text{BCl}_3/\text{SiCl}_4/\text{Ar}$ 1/8/16 sccm, RF = 200W, ICP = 100W, $p=6\text{ mTorr}$, $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$), jota on aiemmin testattu vastaavissa yhteyksissä. Testeissä käytettiin materiaalina GaAs/AlGaAs rakennetta GaInNAsSb kvanttikaivoilla. Altaat on tarkoitus syövyttää lävitse koko rakenteesta noin $3\text{ }\mu\text{m}$ syvyyteen.

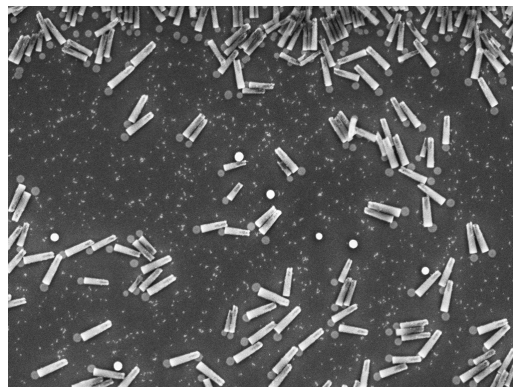
Ensimmäisissä testeissä havaittiin ettei nikkeliä pystytty höyryttämään vaaditulla nopeudella. Nikkelin korvaajaksi valittiin seuraaviin testeihin alumiini, joka on kesittänyt vaaditun nopean höyrystysnopeuden. Ongelmia testeissä oli myös fotolitografiavaiheessa harjanteiden valotuksessa ja kehityksessä. Johtuen harjanteiden kapeudesta erityisesti $1,0\text{ }\mu\text{m}$ harjanteen leveys ei auennut kunnolla. Tämä vaati erikseen hienosäätöä prosessiparametreissa ja on edelleen huomioitava prosessissa erityisesti, jos muita muututtuja ilmenee.

Testisarjan ensimmäisessä osassa ongelmia ilmeni myös puolijohde ICP-syövytyksessä altaisiin muodostuvista kapeista pilareista, joita paikoin esiintyi hyvinkin tiheään. Esimerkkejä näistä pilareista on kuvissa 5.10 (a) ja (b) Pilareiden halkaisija tyypillisesti näissä testeissä oli joitakin kymmeniä nanometrejä. Eräältä näytteeltä laskettuna saatiin arvioksi pilareiden esiintymistiheyden vaihtelevan välillä $0,01\text{--}14\text{ kpl}/\mu\text{m}^2$ alueesta riippuen. Erityisesti pilareita oli havaittavissa alueilla, joissa edellisen epäonnistuneen fotolitografiavaiheen jäljiltä oli ollut valotettuna kuvio, ku-

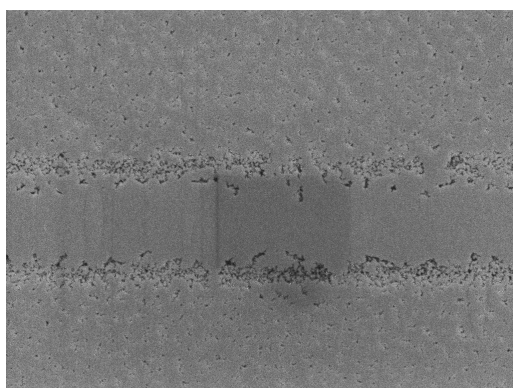
ten kuvasta 5.6(a) selkeästi nähdään. Tämä kuvio toistui pilareiden muodostamana näytteen pinnassa. Vaikuttaisi siltä, että pilarit aiheutuvat piidioksidin pinnalle jääneistä toistaiseksi tuntemattomista jäämistä, jotka toimivat suojaavana maskina RIE- ja ICP-syövytyksen aikana. Esimerkki tällaisista jäämistä löytyy kuvista 5.10 (c) ja (d).



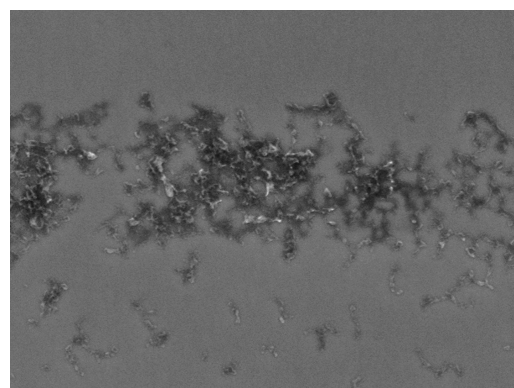
(a) Näytteen pinta nikkelimaskilla RIE-syövytyksen jälkeen. Altaan alueella edellisen litografiayrityksen jättämä kuvio, jonka SiO_2 pilarit muodostavat.



(b) Pilareita kaatuneina 5 minuutin HCl -kylvyn jälkeen. HCl -kylvyn pitäisi poistaa nikkelin näytteen pinnasta. Pilarit ovat siis luultavasti piidioksidia.



(c) Kontaminaatiojäämät mukailevat fotolitografia vaiheessa muodostetun harjanteen muotoa. Tumma varjo keskellä kuvaa aiheutuu SEM:n elektronisuihkun aiheuttamasta pinnan varautumisesta.



(d) Lähikuva kontaminaatiosta. Jäämien ja-kauma ja koko vastaa ICP-syövytyksessä muodostuvia pilareita.

Kuva 5.6 SEM-kuvia puolijohteen pinnasta: (a) ja (b)-kohdissa SiO_2 -maskin kanssa, (c) ja (d)-kohdissa SiO_2 poiston jälkeen. SiO_2 :n poistamiseen käytetty 5 minuutin BHF-liotusta.

Tätä oletusta tukisi havainto näytteellä, jolta poistettiin piidioksi BHF-liotuksella (bufferoitu vetyfluorihappo) epäonnistuneen fotolitografian jälkeen. Näyte oli ker-

taalleen kuvioitu resistillä ja resisti poistettu ennen piidioksidin poistoa. SEM-kuvissa kuitenkin on havaittavissa pintaan jääneiden jäämien muodostama kuvio, joka valotettiin aikaisemmin. Tämän perusteella jäämät selvästi ovat varsin kestäviä ja voisivat mahdollisesti toimia maskina pilareille syövytyksessä. Pilarit ovat olleet yksi pääongelmista myös ensimmäisiä testejä seuranneissa prosesseissa.

Samoin ongelmallinen piirre ovat näytteen pinnassa esiintyvät toistaiseksi tuntemattomat jäämät. Piidioksidin pinnassa on useassa eri prosessivaiheessa ICP-syövytyksen jälkeisen resistin poiston jälkeen havaittavissa oleva ohut, riekaleinen kalvo. Riekalet eivät liukene liuottimiin kuten asetoniin, isopropanoliin tai S1165:een, mutta happiplasmakäsittely vaikuttaisi vähentävän kontaminaation määrää. Tällä hetkellä todennäköisimpänä vaihtoehtona on, että kyseessä on joko resistin tai HMDS:n jäämä. Täydellistä keinoa kontaminaation poistamiseen ei ole löytynyt. Toisaalta suora osoitus kontaminaation haitallisuudesta komponentin toiminnalle ei ole, vaan pienemmissä määrissä kyseessä on lähinnä esteettinen haitta.

5.3.2 Komponenttien kehitystyö

Edellä kuvatuista ongelmista huolimatta testiprosessien ja olemassa olevien standardityövaiheiden avulla koostettiin varsinainen prosessi koko mutkakomponenttia varten. Tässä osiossa esitellään kyseisen prosessin kehitystyö, jonka jälkeen kuvataan viimeisin käytetty prosessi kokonaisuudessaan. Kehitystyön aikana on käyty lävitse kirjoitushetkeen mennessä yhteensä seitsemän erilaista versiota, joskin jokainen versio on perusrungoltaan vastaava kuin myöhemmin kuvattava prosessi. Seuraavassa keskitytään siis yksittäisten vaiheiden, ongelmatapausten ja havaintojen käsittelyyn.

Tässä työssä esitetyt tulokset perustuvat pääosin ensimmäiseen kuuteen versioon. Ensimmäiset viisi versiota on tehty harjanteiden syövytysvaiheessa alumiinimaskin avulla tehdyllä SiO_2 -maskilla. Lopussa esitetystä prosessista poiketen ensimmäisissä prosesseissa on käytetty harjanteiden tukemiseen ja päällystämiseen DOW:n CYCLOTENETM 4000 sarjan -polymeeriä (viitataan tulevaisuudessa: BCB). BCB levitetään koko näytteelle ja syövytetään pois tasaisilta alueilta RIE:llä kaasuilla O_2/SF_6 , jättäen kalvon vain altaiden alueelle. Viimeisimmissä prosesseista BCB:n käytöstä luovuttiin tulevassa osiossa esitettyjen ongelmien vuoksi.

Ensimmäinen testiprosessi

Ensimmäisessä testiprosessissa harjanteet syövytettiin pinnan epitaksiaalirakenteesta läpi noin $3,2\text{ }\mu\text{m}$ syvyyteen. Prosessin aikana ei havaittu erityisiä ongelmia. Kuitenkin sirujen PI-käyrien mittauksissa todettiin sirujen joko hajoavan alhaisilla virroilla (yleensä $< 100\text{ mA}$) tai etteivät ne toimineet lainkaan. Tämä koski myös perinteisiä suoria RWG-komponentteja. Parhaimmassakin tapauksessa pulssitetulla virralla kynnysvirta oli varsin suuri (250 mA) ja kynnysvirran yläpuolisen käyrän kulmakerroin erittäin pieni ($0,007\text{ W/A}$). Tasavirralla pumpattuna toiminta oli vielä heikompaa.

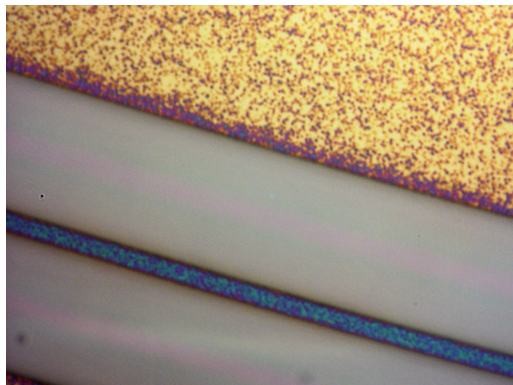
Koska käytetty materiaali oli testattu aikaisemmin toimivaksi, suorien harjanteiden toimimattomuus viittaa ongelmaan prosessivaiheissa. Yhtenä syynä epäiltiin olevan harjanteiden vaurioituminen jostain syystä. Massiivisia vaurioita ei havaittu SEM-poikkileikkauksissa, mutta pienempien murtumien mahdollisuutta keskellä näytettä ei voitu poissulkea. Toisena mahdollisena syynä tarkasteltiin mahdollisuutta syvän harjanteiden syövytyksen aiheuttamaa ongelmaa optisen kentän etenemisessä ja vahvistumisessa harjanteissa, jotka on syövytetty läpi koko epitaksiaalirakenteesta.

Toinen testiprosessi

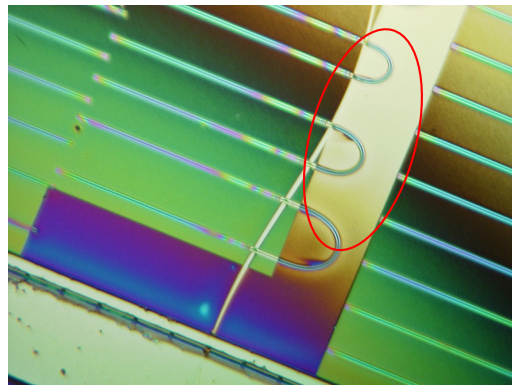
Toisessa näytteessä harjanteiden muodon vaikutusta pyrittiin testaamaan kokeilemalla korkeiden harjanteiden lisäksi versiota, jossa vain mutkan alueella on korkeita harjanteita ja suorilla osuuksilla alaiden syövytys pysäytetään ennen aktiivialuetta. Mutkissa syövytyssyvyys oli noin $3,2\text{ }\mu\text{m}$ ja matalilla alueilla suorilla osuuksilla $1,1\text{ }\mu\text{m}$. Toisessa näytteessä altaat syövytettiin kauttaaltaan syviksi: $3,0\text{ }\mu\text{m}$.

Ongelmaksi kahden eri syövytyssyvyyden näytteessä muodostui syvyyksien vaihtuessa muodostuva porras, jonka alueella uriin levitettävä BCB-kerros levittyi liian ohueksi ja syöpyi lähes kokonaan ylimääräisen BCB:n syövytyksen aikana. Toinen ongelma oli näytteen pintaan ICP-syövytyksen jälkeisen SiO_2 :n poiston ja sitä seuranneen avauksia varten tehdyn SiN_x kasvatuksen jälkeen havaittu pinnan runsas kontaminaatio, josta on esimerkkejä kuvassa 5.7. Pinnassa on mikroskooppilla ja SEM:llä kuvattuna havaittavissa tiheässä pieniä nyppyjä. Pinnan tuntemattoman kontaminaation ja BCB-ongelman vuoksi prosessi keskeytettiin.

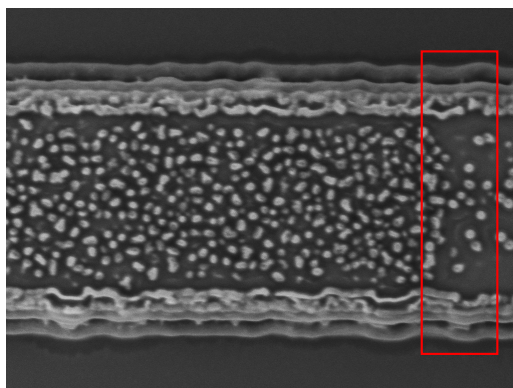
Vastaavaa kontaminaatiota on havaittu myös seuraavissa prosesseissa. Kontaminaation tarkka alkuperä on edelleen tuntematon ja sen poistamiseksi yritetyt käsittelyt ovat epäonnistuneet. Poistamisen sijaan etusijalla on ollut kontaminaation lähteen selvittäminen ja siten ongelman ehkäiseminen. Ongelma muuttuu havaittavaksi vasta joko SiO_2 tai SiN_x kasvatuksen yhteydessä, mutta sen alueellinen riippuvuus viittaa alkuperään aikaisemmissa prosessivaiheissa.



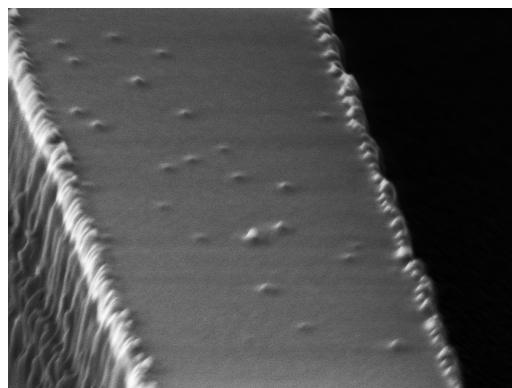
(a) Lähikuva mikroskoopilla näytteen pinnassa havaitusta kontaminaatiosta. Kontaminaatiota on keskimäärin eniten harjanteiden ja altaan reunojen ympäristössä.



(b) Yleiskuva kontaminaatiosta mikroskoopilla. Kontaminaatio vaihtelee näytteen pinnalla alueittain. Mutkien kaksoissyövytetyillä alueilla kontaminaatio on vähäisempää.



(c) SEM-kuva harjanteesta. Kontaminaatio vähenee huomattavasti kaksoissyövytetyllä mutka-alueella kuvan oikeassa reunassa.



(d) SEM-kuva. Kontaminaatio muodostaa puolijohteen pintaan kiinteitä nyppyjä.

Kuva 5.7 Esimerkkejä piinitridin kasvatuksen jälkeen havaittavasta kontaminaatiosta mikroskooppi- ja SEM-kuvissa.

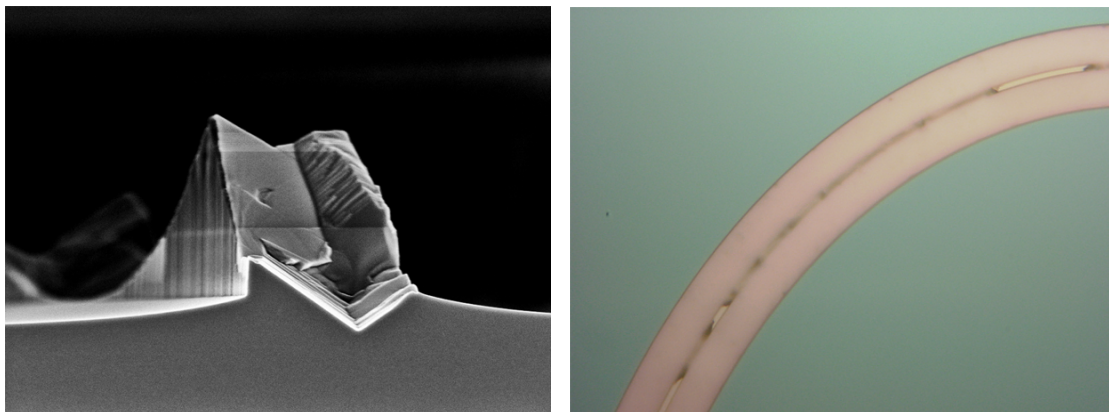
Tästä on erityisesti osoituksena kontaminaation keskimääräistä vähäisempi esiintyminen alueilla, joissa ei ole ollut suojaavaa resistimaskia harjanteen toisen syövytysvaiheen aikana, kuten kuvasta 5.7(b) nähdään. Toisena huomiona on koko näytteen

mittakaavassa kontaminaation jakautuminen. Kuvasta 5.7(b) myös nähdään, että nyppujen aiheuttamaa värvirheen jakauma näytteen pinnassa on reunaltaan kaartuva ja vaihteleva ja ulottuu ainoastaan syövyttämättömille alueille niiden reunoja mukaillen. Tämä käyttäytyminen viittaisi mahdollisesti yhteyteen plasmakäsittelyihin. EXD-kuvauksella (eng. energy-dispersive X-ray spectroscopy) nyppujen materiaalista ei saatu selvää analyysiä. Hiilen vähäisyyden perusteella BCB-polymeerin osallisuuden todennäköisyys on kuitenkin pieni.

Kolmas testiprosessi

Kolmannessa prosessissa ongelmat BCB:n paksuusvaihtelussa ratkaistiin käyttämällä kaksoiskerrosta paksuusvaihtelun tasaamiseksi. Testeissä tämä menetelmä havaittiin toimivaksi ja riittävän tasaisen kerroksen lisäksi BCB:n paksuus altaissa kasvoi suhteessa pinnan tasanteiden paksuuteen, jolloin RIE-syövytyksessä oikea syövytysaika ei ole aivan yhtä kriittinen kuin ohuemmilla kerrospaksuuksilla. Testissä oli kaksi näytettä: ensimmäisessä harjanteet syövytettiin kauttaaltaan aktiivikerroksesta lävitse, toisessa syvää syövytystä käytettiin vain mutkissa. Tämä prosessi kuitenkin keskeytyi korkeiden harjanteiden hajottua jälkimmäisessä näytteessä RIE:ssä tehdyn happiplasman jälkeen. Plasmakäsittelyä ennen näytettä oli liotettu S1165-liuoksessa ultraäänen avustaessa resistin poistossa. Kuvassa 5.8(a) on nähtävänä poikkileikkausprofiili hajonneesta harjanteesta. Kuvassa 5.8(b) on esillä mikroskooppikuva mutkan alueesta, jossa harjanne on suurilta osin tuhoutunut. Harjanne on lohjennut kidetasojen mukaan ja syy on selvästi mekaaninen rasitus.

Vaikka tässä tapauksessa harjanteisiin kohdistunut vahinko tuli näkyviin vasta plasma-ajon jälkeen myöhemmät prosessit osoittavat, että todellisuudessa ultraääni toimii korkeiden harjanteiden hajottajana. Toisaalta, vaikka vaikutus on nähtävissä ainoastaan kapeissa ja korkeissa harjanteissa, ei ole varmuutta siitä millainen vaikutus ultraäänellä on mataliin harjanteisiin. Todistus ultraäänen tuottamista vahingoista materiaalille antaa kuitenkin synn epäillä, että ensimmäisessä prosessissa sirujen huono toiminta olisi mahdollisesti voinut aiheutua ultraäänikäsittelyn tuottamasta vahingosta rakenteeseen.



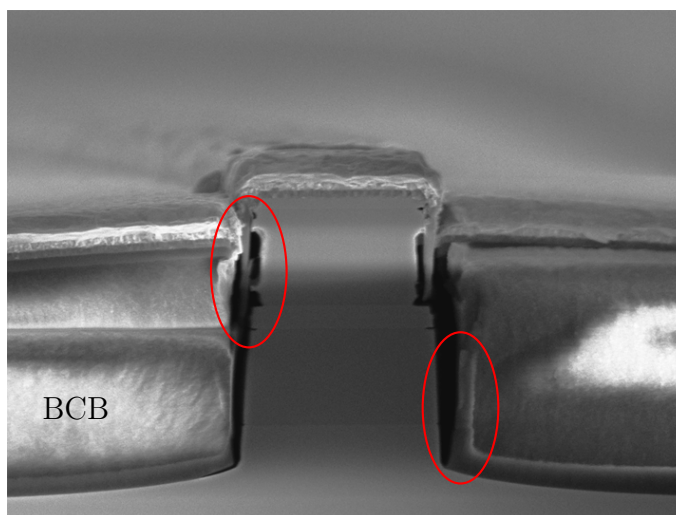
(a) SEM -poikkileikkauskuva hajonneesta harjanteesta. Harjanne vaikuttaa hajonneen mekaanisen rasituksen alaisena. (b) Mikroskooppikuva mutka-alueesta, jossa harjanne on lähes kokonaan tuhoutunut.

Kuva 5.8 SEM- ja mikroskooppikuvista nähdään ultraäänen aiheuttama korkean harjanteen tuhoutuminen mutkissa.

Neljäs testiprosessi

Neljänteen prosessiin tehtiin vastaava näyte samalla materiaalilla kuin kolmannessa prosessissa hajonnut näyte ja ehjää korkeiden harjanteiden näytettä kolmannesta prosessista jatkettiin. Prosessissa käytettiin kaksois-BCB-kerrosta edellisen tapaan. Ultraääntä ei prosessoinnissa käytetty harjanteiden syövyttämisen jälkeen. Sirujen ulostulotehon mittauksessa havaittiin kuitenkin molempien näytteiden toimivan erittäin heikosti sekä tasa- että pulssitetulla virralla. Parhaimpienkin sirujen tapauksessa kynnysvirta oli korkea ja PI-käyrän kulmakerroin alhainen.

Sirujen poikkileikkausta tarkasteltaessa havaittiin harjanteiden seinämissä voimakasta syöpymistä. Kuvassa 5.9 on esimerkki tästä. Tämän lisäksi, kuten myös joissakin aikaisemmissa tapauksissa, harjannetta ympäröivä BCB-kerros oli irrallaan harjanteen seinämästä. Seinämän syöpymisellä ja BCB:n irtoamisella on arveltu voivan olla yhteys, jos BCB-kerroksen ja harjanteen väliin pääsee syövyttävää ainetta, joka jää ansaan muodostuneeseen taskuun. BCB:n irtoamisessa harjanteesta kauttaaltaan ei ole varmuutta. On myös mahdollista että kerros on irrallaan ainoastaan fasettien kohdalta pilkkomisen aiheuttamana. Toinen vaihtoehto syöpymisen aiheuttajalle on harjanteiden seinämissä usein havaittu tuntematon kontaminaatiokerros, joka on havaittavissa heti harjanteiden syövytyksen jälkeen.

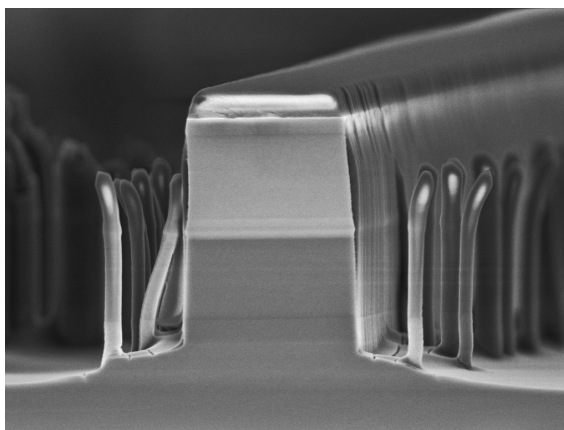


Kuva 5.9 Epitaksiaalirakenteesta lävitse syövytetty harjanne, jonka reunassa BCB on irtoillut ja seinä syöpynyt.

Viides testiprosessi

Viidennessä testiprosessissa tarkoituksena oli pyrkiä poistamaan seinämällä esiintyvää kontaminaatiota ja ratkoa ongelmaa BCB:n irtoilemisesta harjanteen seinämästä. Testit kontaminaation poistamiseksi eivät kuitenkaan tuottaneet tulosta. Lisäksi harjanteiden reunamille muodostui puolijohteen syövytyksen jälkeen runsaasti pilareita kaikkialle näytteellä. Kuvassa 5.10 on esimerkki näistä pilareista. Lopullisesti prosessin hylkäämiseen johti ylimääräisen BCB:n syövytyksen epäonnistuminen näytteen pinnasta. BCB on herkkä roskaantumiselle ja pienetkin roskat aiheuttavat pinnassa liiallisia paksuusvaihteluja, jolloin syövytys ei onnistu halutulla tavalla. BCB ei lähtenyt pinnasta riittävässä määrin osin johtuen roskaisuudesta tai muusta epätasaisuudesta BCB:ssä. Tämän seurauksena BCB:n poistoyritysten aikana puolijohteen pinnassa oleva GaAs-kontaktikerros syöpyi huomattavia määriä ja harjanteet niin ikään vaurioituivat. Tämän seurauksena prosessi keskeytettiin.

Tämän prosessin ja aikaisempien BCB:n käytön kanssa havaittujen ongelmien myötä BCB:n käytöstä päätettiin luopua ja korvata se 300 nm paksulla SiN_x -kerroksella. Harjanteen reunoja ympäröidessään SiN_x antaa harjanteelle jossain määrin tukea ja sen optiset ominaisuudet ovat riittävän samankaltaiset, että optisen kentän kullussa harjanteessa ei pitäisi muodostua ongelmia. BCB:n taitekerroin on noin 1,55 paistolämpötilasta riippuen [37] ja piinitridillä taitekertoimen voisi arvioida olevan noin 1,9 1300 nm aallonpituudella [21]. Taitekerroin riippuu kasvatusolosuhteista,



Kuva 5.10 SEM-kuva erityisesti harjanteen reunoille muodostuvista pilareista. Pاهimillaan pilarit peittävät koko altaan pohjan.

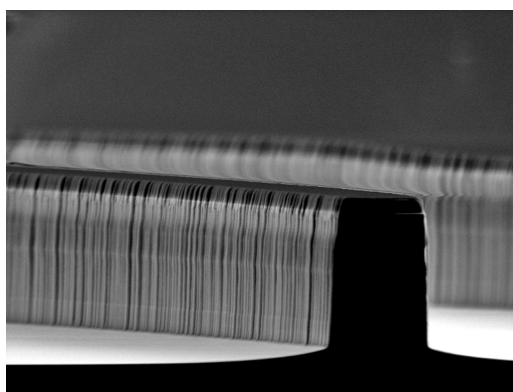
kuten kaasujen NH_3/SiH_4 suhteesta [22]. GaAs:n taitekerroin puolestaan 1300 nm aallonpituudella on 3,40 [32].

Altaiisiin puolijohteen syövytyksessä muodostuvat pilarit ovat olleet yksi merkittävä ongelma prosessin kehityksessä useiden prosessiversioiden kohdalla. Pilareiden muodostuminen osittain vaikuttaisi olevan kytkeytynyt SiO_2 -kerroksen kasvatukseen ja syövytykseen. PECVD:llä kasvatetun piidioksidin kerrospaksuus vaihtelee näytteen reunojen ja keskialueen välillä, kuten ohutkalvon väri vaihtelusta voidaan päätellä. Reunoilla kerros on paksumpi oletettavasti johtuen plasman sähkökentän erilaisesta käyttäytymisestä näytteen reunoilla. Paksuusvaihtelu piidioksidissa puolestaan vaikuttaa RIE-syövytykseen, jolla SiO_2 -kerrokseen syövytetään maskin avaukset.

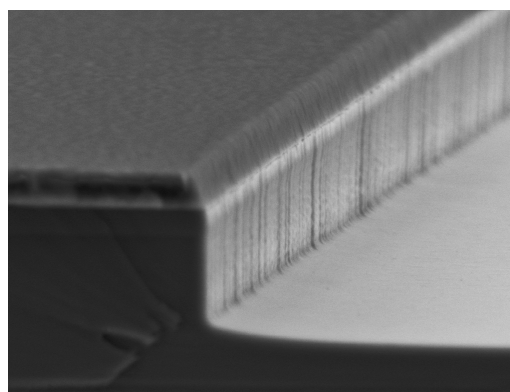
Prosesseissa ja muissa testeissä on havaittu pylväiden runsasta esiintymistä näytteen reunoilla ja erityisesti niillä alueilla, jotka ovat olleet reuna-alueita PECVD-kasvatuksessa. Niissä näytteissä, jotka on pilkottu piidioksidin kasvatuksen jälkeen osiin, ja jotka on prosessoitu tämän jälkeen erillään, reunan pilarinmuodostusta on havaittavissa vain alkuperäisen näytteen ulkoreunoilla. Tällöin piidioksidiin yhteydessä oleva ongelma, joka aiheuttaa pilareita on osin myös yhteydessä piidioksidin paksuuteen ja mahdollisesti olisi kierrettävissä pidemmällä syövytyksellä poikkeavan pinnan poistamiseksi ennen puolijohteen syövytystä.

Kuudes testiprosessi

Kuudennessa prosessissa tätä ajatusta hyödynnettiin toisessa prosessoiduista näytteistä, jossa metallimaskin kanssa SiO_2 :a syövytettiin RIE:ssä 4 minuuttia yliaikaa sen jälkeen, kun piidioksidi oli mittauskohdasta näytteen keskialueella syöpynyt lävitse. Toisessa näytteessä vältettiin metallimaskin käyttö, sillä metallin on epäilty olevan mahdollinen lähde pilareita aiheuttavaan mikromaskiin. Metallimaskin sijaan käytettiin ohuempaa SiO_2 -kerrosta (500 nm \rightarrow 300 nm) ja SiO_2 syövytettiin suoraan 1,8 μm paksun AZ6612-resistimaskin avulla. Ohuempi piidioksidi on tarpeen, jotta varmistetaan resistimaskin kestäminen RIE-syövytyksen aikana. Molemmissa näytteissä käytettiin harjanteessa rakennetta, jossa vain mutkan alue syövytetään rakenteesta lävitse ja suorilla alueilla syövytys pysäytetään ennen aktiivialuetta. Prosessissa ei harjanteiden syövytyksen jälkeen käytetty ultraääntä.



(a) Kuva metallimaskin avulla prosessoidusta harjanteesta. Harjanteen korkeus noin 3,5 μm .



(b) Kuva altaan seinämästä näytteessä, joka on prosessoitu ilman metallimaskia. Seinämän korkeus on noin 0,90 μm .

Kuva 5.11 SEM-kuvat syövytetyistä altaista ICP-syövytyksen jälkeen kuvattuna. b)-kohdan näytteen seinämän röpöliäisyys vaikuttaa a)-kohdan näytettä hienojakoisemmalta. Kummassakin tapauksessa seinämät vaikuttavat puhtailta ilman kontaminaatiojäämiä.

Molempien näytteiden tapauksessa pilareita ei muodostunut muualle kuin aivan näytteen reunoille, jossa piidioksidi oletettavasti oli paksuimmillaan. Aiemmissa prosesseissa havaitusta näytteen pinnan kontaminaatiosta havaittiin ainoastaan heikkoja viitteitä toisessa näytteistä. Harjanteiden seinämiä vertailtaessa havaittiin, että ilman metallimaskia tehdyn näytteen harjanteen seinämän röpöliäisyys on hienojakoisempaa verrattuna toiseen näytteeseen. Tämä voidaan todentaa SEM-kuvista 5.11(a) ja 5.11(b). Tämän havainnon perusteella on perusteltua siirtyä käyttämään

prosessia ilman metallimaskia. Näytteet prosessoitiin loppuun ilman merkittäviä ongelmia. Suurimmat ongelmat ilmenivät piinitridiin tehtävien avausten aikana, jolloin aivan kaikkien komponenttien harjanteita ei saatu kokonaan avautumaan. Prosessin päätteeksi näytteistä pilkottiin siruja, jotka kiinnitettiin mittausalustoille hopeapoksilla n-puolelta ja yhdistettiin p-puolelta kultalangoilla alustaan. Näytteiden mittaus ja tulosten käsittely on esitetty seuraavassa luvussa.

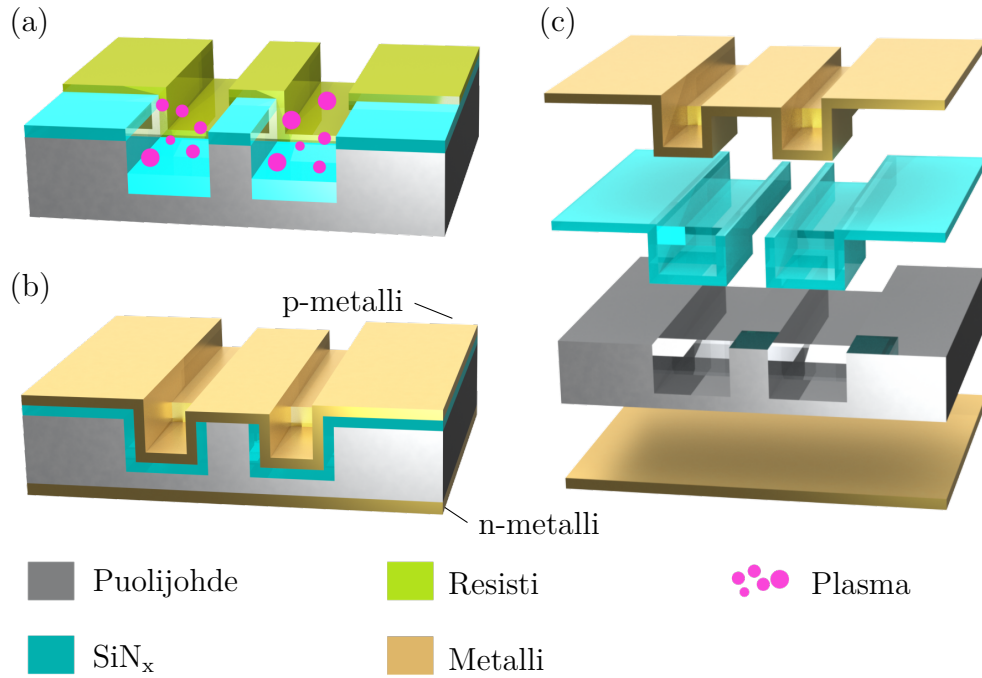
Tässä osiossa käydään lävitse prosessivaiheet, joita käytetään Euler-SOA -komponenttien valmistukseen. Prosessi on monilta osin hyvin samankaltainen kuin katkaisumerkillisten sirujen ja noudattaa myös ORC:llä käytettävää vakiintuneita prosessivaiheita soveltuvien osin. Niiltä osin kuin prosessi on identtinen edellä kuvatun kanssa, seuraavassa prosessin kuvauksessa jätetään erittelemättä yksittäiset prosessivaiheet. Kuvassa 5.5 esitetyt prosessivaiheet pätevät siis suurelta osin myös tässä. Kuvassa 5.12 (a) on esitetty työvaihe, joka poikkeaa katkaisumerkkiprosessista. Kuvissa 5.12 (b) ja (c) nähdään valmiin sirun rakenne. Prosessivaiheet on myös kokonaisuudessaan esitetty liitteen 1 taulukossa 2.

5.4 Prosessivaiheet Euler-SOA -komponenteissa

Prosessin osalta merkittävimpänä rakenteellisena erona on harjanteen kaksoissyövytys ja katkaisumerkkien puuttuminen. Harjanteiden prosessoinnissa on käytetty kahta eri menetelmää ICP-syövytyksen aikana käytettävän suojaavan maskin toteutuksessa: alumiini lift-off -prosessin avulla tehty paksu SiO_2 -maski ja ohuempi, pelkän suojaavan resistin avulla toteutettu, SiO_2 -maski. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa piidioksidimaskin paksuutta rajoittaa RIE-syövytyksen aikana suojaavan resistimaskin kestävyys, jolloin syövytettävä SiO_2 -kerros ei saa olla niin paksu, että resistimaski ehtii pettämään syövytyksen aikana.

Ensimmäisessä vaihtoehdossa puolijohteen pintaan kasvatetaan 500 nm SiO_2 -kerros, jonka päälle kuviodaan fotolitografialla käänteinen kuvio 1,6 μm paksulla AZ5214E-resistikerroksella. Tämän jälkeen pintaan höyrystetään 20 nm paksu alumiinikerros suurella höyrystysnopeudella (noin 1 nm/s). Edellä kuvatun lift off-menetelmän tapaan ylimääräinen alumiini ja resisti poistetaan ja SiO_2 -maski syövytetään RIE:ssä. Tämän jälkeen alumiinimaski poistetaan liottamalla MicroChemicals HCl-pohjaisen AZ351B-kehittimen ja veden 1:1-liuoksella.

Toisessa vaihtoehdossa harjanteita varten fotolitografiavaiheeseen puolijohteen pin-



Kuva 5.12 (a) Mutka-alueen harjanteen toinen ICP-syövytysvaihe resistimaskin avulla aikaisemmin kasvatetun piidioksidin suojatessa muita alueita. (b) Liioiteltu malli valmiin Euler-SOA -komponentin rakenteesta. (c) Valmiin komponentin sisältämät materiaalikerrostumat. Kuvasta nähdään myös mutkan alkaessa muodostuva askelma.

nalle kasvatetaan 300 nm paksu SiO_2 -kalvo. Tämän jälkeen toteutetaan fotolitografiavaihe noin $1,8\ \mu\text{m}$ paksulla AZ6612-resistikerroksella. Kuvioinnin jälkeen SiO_2 syövytetään avoimilta alueilta RIE:llä CHF_3/Ar -plasmalla. Tämän jälkeen resisti poistetaan S1165-liuottimella ja tarvittaessa happiplasmalla.

SiO_2 -maskin avulla tehdään ensimmäinen puolijohteen syövytys ICP:llä reseptillä $\text{BCl}_3/\text{SiCl}_4/\text{Ar}$ 1/8/16 sccm, 20°C lämpötilassa 6 mTorr paineessa, 200 W RF-teholla ja 100 W ICP-teholla. Tarkoitus on syövyttää harjannetta ympäröivät altaat lähes aktiivikerrokseen asti, noin $1100\ \mu\text{m}$ syvyyteen. Tässä vaiheessa käytetty syövytysresepti on erityisen oleellinen, sillä syövytettävän harjanteen tulisi olla mutka-alueilla mahdollisimman tasainen häviöiden minimoimiseksi.

Toista harjannesyövytystä varten tehdään toinen resistimaski fotolitografialla. Tässä vaiheessa käytetään noin $2,8\ \mu\text{m}$ paksua AZ6632-resistikerrosta. Maski suojaa näytteellä harjanteiden suorat osuudet ja jättää paljaaksi mutka-alueet. Mutka-alueilla puolestaan on vielä jäljellä SiO_2 -maski. Resistimaskin avulla syövytystä jatketaan

ICP:llä samalla reseptillä kunnes harjanteen korkeus on mutka-alueilla noin $3,5\text{ }\mu\text{m}$. Tämän jälkeen resisti poistetaan liuottimella ja jäljelle jäänyt SiO_2 -maski syövytetään pois RIE:llä samalla reseptillä kuin aiemmin kuvattu SiO_2 poisto on tehty. Plasmasyövytyksen jälkeen resisti saattaa olla kovettunut pintaan ja poistaminen on hankalaa. Yleensä poistamisen helpottamiseksi näytettä pidetään liuottimen kanssa ultraäänialtaassa. Testit kuitenkin osoittavat, että ultraääni rikkoo korkeita harjanteita, joten harjanteiden syövytyksen jälkeen ultraääntä ei voida käyttää prosessissa.

Harjanteiden prosessoinnin jälkeen pintaan kasvatetaan eristävä piinitridi-kalvo, johon harjanteiden kohdalle tehdään avaukset virransyöttämiseksi. 300 nm paksu SiN_x -kerros kasvatetaan PEVCD:llä. Avaukset kuvioidaan fotolitografialla noin $3,2\text{ }\mu\text{m}$ paksuiselle AZ6632-resistille. Katkaisumerkkikomponenttien tapaan resisti avataan ainoastaan harjanteiden päältä siten, että suojaavaa resistiä jää harjanteiden reunoille. Tämän jälkeen SiN_x syövytetään RIE:llä pois harjanteiden päältä samalla reseptillä kuin SiO_2 -avaus tehtiin. Ainoana erona on, että SiN_x vaatii piidioksidia pidemmän syövytysajan. Syövytyksen jälkeen resistimaski poistetaan liuottimella.

Tämän jälkeen etupuolelle tehdään p-metallikontaktit, kuten aiemmin kuvattiin. Prosessin ollessa vielä kehitysvaiheessa, jolloin sirun integroitavuus ei vielä ole oleellista, metallikerrokset olivat tässä tapauksessa $\text{Ti/Pt/Au } 50/50/200\text{ nm}$. p-puolen metalloinnin jälkeen näyte ohennetaan $110\text{ }\mu\text{m}$ paksuuteen. Viimeisenä vaiheena toteutetaan n-puolen kontaktimetallikerros vastaavasti kuin katkaisumerkkikomponenteissa. Ensin höyrystetään $\text{Ni/Au/Ge/Au } 5/5/30/90\text{ nm}$ metallikerros, joka seostetaan RTA:ssa $60\text{ s } 370\text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Tämän kerroksen päälle höyrystetään lopuksi kontaktimetallikerros $\text{Ti/Pt/Au } 50/50/100\text{ nm}$. Lopuksi valmis näyte pilkotaan yksittäisiksi siruiksi ja kiinnitetään testimittauksia varten mittausalustoille hopeapoksilla n-puolelta ja langoitetaan p-puolelta kultalangoilla.

6. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

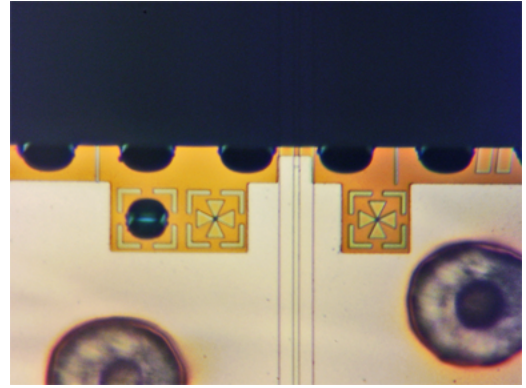
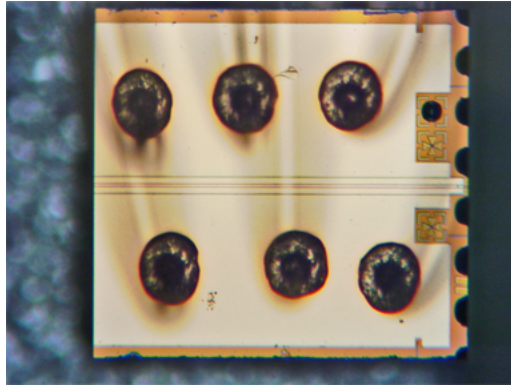
Tässä luvussa tarkastellaan kehitystyön tuloksena aikaansaattujen komponenttien toimintaa laserdiodeina. Tarkastelussa ovat sekä katkaisumerkilliset vinot SOA-komponentit että U-mutkaiset Euler-SOA -sirut. Johtuen rajoitetuista mittausrakenteista komponenttien SOA-toiminnallisuutta ei kyetä tutkimaan tässä työssä, vaan analysoinnissa keskitytään laseroivien sirujen ominaisuuksiin. Luvussa esitellään edellä kuvattujen prosessien avulla tuotettujen sirujen ILV-mittaukset LDC-laitteistolla (eng. laser diode characterization) ja näistä mittauksista saatujen tulosten tarkempi analyysi.

6.1 Katkaisumerkki-SOA -sirut

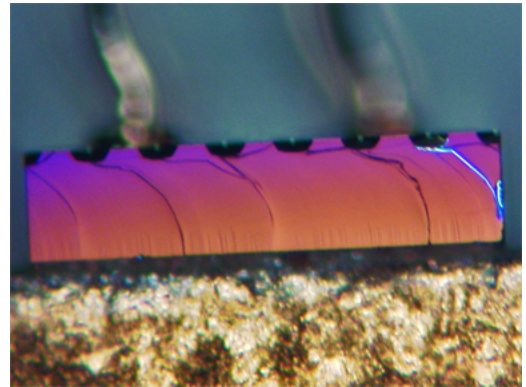
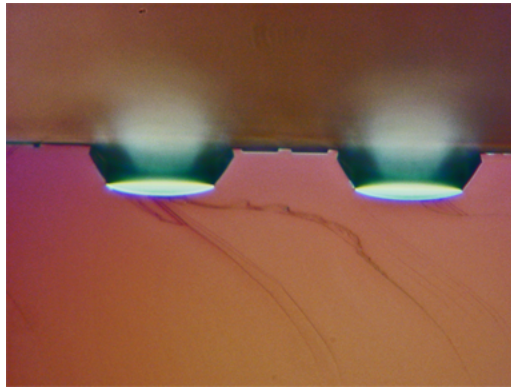
Tuloksissa käsiteltävät sirut prosessoitiin edellä esitetyllä menetelmällä. Käytetyn materiaalin epitaksiaalikerros on GaAs/AlGaAs-rakenne kahdella GaInNAsSb-kvanttikaivolla. Kvanttikaivojen ympärillä ja välissä ovat ohuet jännitteen kompensatio GaNAs-kerrokset, aaltojohteena on GaAs-kerros, kuorikerrokset AlGaAs-seosta ja pinnalla GaAs-kontaktikerros. Harjanteiden leveydet siruissa olivat 2,5 ja 4,0 μm .

Mittauksia varten pilkottiin katkaisumerkkien avulla 600 μm pitkiä siruja. Kuvassa 6.1(b) on esimerkki katkaisumerkeistä sirun päädyssä ja kuvassa 6.1(a) esimerkki 600 μm pitkästä sirusta suoralla RWG:llä. Suoria harjanteita käytettiin mittauksissa tarkasteltaessa pilkkomismenetelmien tuottamien fasettien laatua ja siten sirun toimintaa.

Kuvissa 6.1(c)-6.1(f) on esillä esimerkkejä fasettien pinnoista mikroskoopilla kuvattuna. Kuvat 6.1(c)-6.1(e) ovat katkaisumerkillisistä faseteista ja kuva 6.1(f) fasetista pilkottuna perinteisesti pilkkojalla piirretyn alkuviillon avulla. Kuvista nähdään, että kokonaisuudessaan alkuviillolla avustettu pilkkoutuminen tuottaa mikroskoopin erotuskyvyllä tasaisen fasettipinnan. Katkaisumerkkien avulla pilkotut pinnat ovat merkkien alapuolelta selvästi epätasaisia. Kuitenkin pilkkoutumisen onnistues-

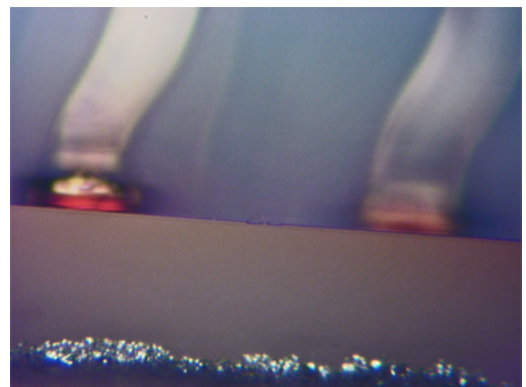
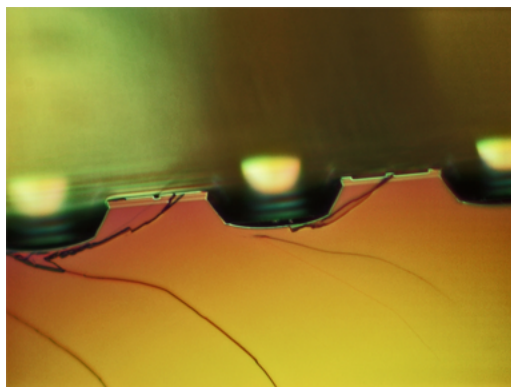


(a) Kuva mittauksissa käytetystä suoran RWG:n katkaisumerkki-SOA:sta. Katkaisumerkit nähtävissä sirun oikeassa reunassa. Pinnassa näkyvät ympyrät kuuluvat kulta-lankoihin.



(c) Poikkileikkaus. Sirun fasetti katkaisumerkkien kohdalta. Keskellä on nähtävissä harjanne ja altaat. Kannaksen alueella ei tällä erotuskyvyllä ole havaittavissa siirroksia vaan lähimmät jäävät merkkien alapuolelle.

(d) Kuva koko sirun fasetista. Suurimmat siirtymät ovat havaittavissa selkeästi myös mikroskoopilla.



(e) Kuva huonoimmasta mitatun sirun fasetista, jossa oikean puoleisella kannaksella ki-detasojen siirros osuu harjanteen alueelle.

(f) Perinteisesti pilkottu fasetti, jossa ei ole havaittavissa siirtymiä. Harjanne ja allas ovat erotettavissa keskellä kuvaa.

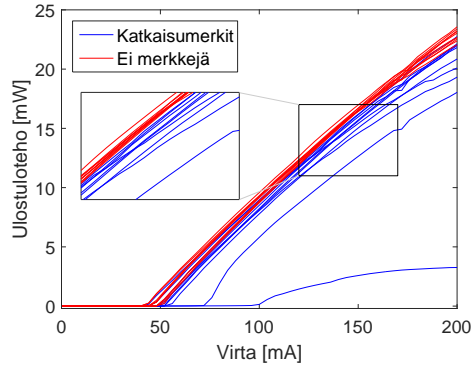
Kuva 6.1 Kuvakooste mittauksissa käytetyistä katkaisumerkki-SOA- siruista ja faseteista mikroskoopilla kuvattuna.

sa merkkien välinen kannas pilkkoutuu siististi jättäen harjanteen alueen tasaiseksi, kuten kuvassa 6.1(c). Kuvassa 6.1(e) on esimerkkinä huonoin fasetti, jossa siirtymä kidetasolta toiselle osuu juuri harjanteen kohdalle. Tällä hetkellä fasettien onnistuminen on jokseenkin satunnaista ja siirtymien ilmestyminen kannasten alueelle heikentää saantoa. Alustavat testit kuitenkin viittaavat mahdolliseen ratkaisuun saannon parantamiseksi.

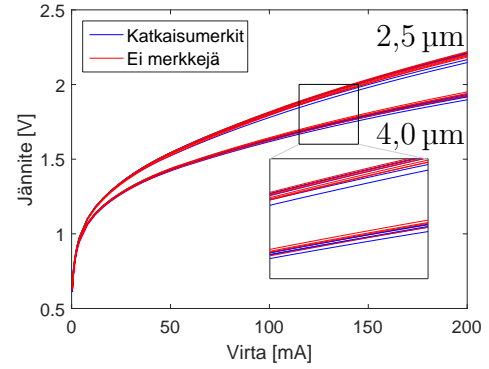
Sirujen pituuksien tarkempaa mittausta varten katkaisumerkinäytteet lähetettiin VTT:lle analysoitavaksi. VTT:n mittauksissa selvitettiin katkaisumerkeillä avustetun pilkkoutumisen tarkkuus. Mittauksissa näytteiden reunat fasetteineen kuvattiin mikroskoopilla. Kuvissa mukana olivat näytteiden reunaan prosessoidut kohdistusmerkit, joiden avulla fasetin reuna voidaan paikantaa. Fasettien etäisyyksien vaihteluksi mitattiin ± 250 nm normaalijakaumaan sovittamalla 17 näytteen otoksessa. Mittaustarkkuutta rajoittavia tekijöitä olivat kohdistusmerkkien sijainti, kohteen kiertyminen mittaukseen käytetyissä kuvissa ja fasettien reunan tunnistus. Kohdistusmerkin sijainnin paikannuksen tarkkuudeksi arvioitiin alle $0,25 \mu\text{m}$ ja kiertymisen tuottamaksi virheeksi alle $0,5 \mu\text{m}$. Tämä tarkoittaa, että fasettien pilkkoutumistarkkuudeksi saatu arvo on samaa luokkaa tämän hetkisen mittaustarkkuuden kanssa. Mittaustarkkuuden parantamiseksi käytetyt kohdistusmerkit vaativat muutoksia, jotta erityisesti kuvan kiertyminen saadaan eliminoidua. Verrattuna pilkkojalla aikaansaatavaan usean mikrometrin pituusvaihteluun, katkaisumerkkien avulla saavutetaan huomattava parannus tavoiteltuun SOA-komponenttien pituusvaihtelun kontrollointiin ja siten parannus komponenttien integroitavuudessa SOI-alustalle.

Pilkkoutumisen onnistumisen tarkastelun lisäksi katkaisumerkeillä pilkottujen komponenttien toimintaa verrattiin komponentteihin, joissa toinen fasetti pilkottiin perinteisesti reunaan tehdyn alkuviillon avulla. n-puoli alaspäin mittausalustalle hopeapöksillä kiinnitetyille siruille tehtiin ILV- ja kaukokenttämittaukset. Mittaukset tehtiin 20°C lämpötilassa tasavirralla. Mittaustulokset on esitetty kuvassa 6.2.

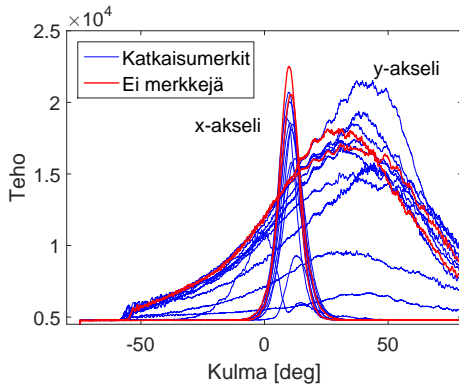
Kuvaan 6.2(a) on kerätty PI-käyrät kaikista mitatuista komponenteista. Käyristä nähdään, että enimmäkseen kynnysvirroissa ja suorien kulmakertoimissa ei juurikaan ole eroa katkaisumerkillisten ja merkittömien sirujen välillä, joskin katkaisumerkkien kanssa toiminta on hieman heikompaa. Heikoin mittaustulos (kynnysvirta noin 100 mA) on saatu kuvan 6.1(e) sirusta, jossa harjanteen alueella on merkittävää vahinkoa fasetilla. Kuvan 6.2(b) VI-käyrissä ei ole komponenttityyppien välillä havaittavissa eroja. Käyrien jakautuminen kahteen ryhmään johtuu harjanteiden le-



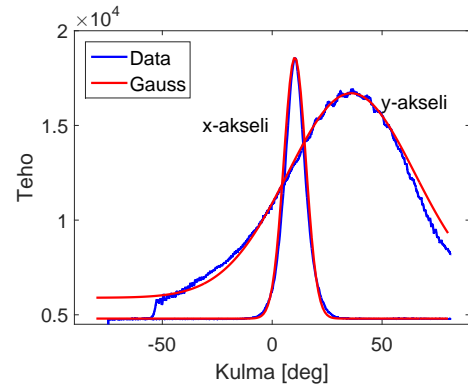
(a) PI-käyrät mitatuista laserdiodisiruista. Katkaisumerkki-sirujen toiminta on keskimäärin hieman merkittäviä siruja heikompi.



(b) PI-käyrät samoista siruista. Mittaustulokset jakautuvat kahteen sarjaan riippuen harjanteen leveydestä.



(c) Kaukokenttämittaukset ulostulevasta valosta. Tehon skaalaus on mielivaltainen. Kaukokentissä ei ole havaittavaa eroa katkaisumerkillisten ja merkittömien sirujen välillä.



(d) Gaussinen sovite katkaisumerkkisirusta mitattuun kaukokenttään. Sovitus onnistuu varsin hyvin kentälle sekä x- että y-akselilla.

Kuva 6.2 SEM-kuvat syövytetystä altaista ICP-syövytyksen jälkeen kuvattuna. b)-kohdan näytteen seinämän röpöliäisyys vaikuttaa a)-kohdan näytettä hienojakoisemmalla. Kummassakin tapauksessa seinämät vaikuttavat puhtailta ilman kontaminaatiojäämiä.

veyksien eroista. Ylempi käyrärypäs on saatu kapeammista $2,5\text{ }\mu\text{m}$ harjanteista ja alempi $4,0\text{ }\mu\text{m}$ harjanteista.

Kuvaan 6.2(c) on koottu siruista tehdyt kaukokenttämittaukset. Mittausten ulostuloteho on arvoltaan mielivaltainen ja käyrien intensiteetit eivät sellaisenaan ole suoraan vertailtavissa. Jakaumien muodon voidaan kuitenkin havaita olevan yhtenäisiä. Lisäksi kuvassa 6.2(d) on tehty katkaisumerkillisen sirun kaukokentälle gaussinen sovite. Sovitteista nähdään kentän x-suunnan sopivan erittäin hyvin sovitteeseen ja

myös y-suunnan sopivan varsin hyvin. Tämän perusteella vaikuttaisi siltä, että myös katkaisumerkkien kanssa saavutetaan odotettu kaukokentän muoto.

Mittaustulokset katkaisumerkkien kanssa vaikuttavat varsin stabiileilta ja yhteneväsiltä verrattuna mittaustuloksiin komponenteista ilman merkkejä, joskin asteen heikentyneiltä. Tähän mahdollisesti vaikuttaa satunnaisesti merkkien välisille kanaksille osuvat kidetasojen siirtymät. Tähän ongelmaan ollaan kuitenkin seuraavissa testausvaiheissa kehittämässä mahdollista ratkaisua. Yhdistettynä VTT:n mittaustuloksiin komponenttien pituuden säätelyn hyvistä tuloksista katkaisumerkkien toiminta SOA-komponenttien integraatiossa VTT:n SOI-alustalle on lupaavaa.

6.2 Euler-SOA -sirut

Tässä osiossa käydään lävitse edellisessä luvussa esitellyn kuudennella Euler-SOA-testiprosessilla tehtyjen sirujen ILV-mittaus (virta, valo ja jännite) ja mittaustulosten analyysi. Komponenteissa käytetty materiaali katkaisumerkki-SOA -sirujen tapaan on GaAs/AlGaAs -rakenne kahdella GaInNAsSb-kvanttikaivolla. Kuten edellisessä luvussa mainittiin pilkotut sirut kiinnitettiin erityiselle mittausalustalle. Alusta on suunniteltu siten, että sen pinta on jaettu eristeellä rajattuihin kontaktialueisiin, joihin mitattava siru kiinnitetään. Näihin eroteltuihin kontakteihin tuodaan virta mittalaitteistossa, jotta sirun ylitse saadaan luotua myötäbias. Siru kiinnitettiin n-puoleltaan hopeapoksilla toiseen kontaktiin ja sirun p-puoli yhdistettiin kultalangoilla toiseen kontaktiin.

Mittauksissa vertaillaan prosessissa valmistettua kahta näytettä toisiinsa ja mahdollisia prosessimenetelmien eroista johtuvia vaikutuksia sirujen toiminnassa. Harjanteiden suunnitellut leveydet kummassakin näytteessä olivat $1,0\ \mu\text{m}$ ja $1,5\ \mu\text{m}$. Fotolitografiavaiheessa syntyneen variaation vuoksi todelliset harjanteiden leveydet näytteellä 1 olivat $1,4\ \mu\text{m}$ ja $2,0\ \mu\text{m}$ ja näytteellä 2 $2,1\ \mu\text{m}$ ja $2,5\ \mu\text{m}$.

Ensimmäiset testimittaukset tehtiin tasavirralla 20°C lämpötilassa LDC-mittauslaitteistolla. Ensimmäisellä mittauskerralla sirut toimivat tyydyttävästi verrattuna aikaisempiin prosesseihin. Mittaukset tehtiin virran alueella $0\text{--}500\ \text{mA}$. Kynnysvirrassa oli jonkin verran variaatiota, mutta keskiarvo oli noin $150\ \text{mA}$ ja kulmakerroin molemmilla näytteillä noin $0,07\ \text{W/A}$. Mitatut kaukokentät vaikuttivat normaaleilta. Spektrimittauksista aallonpituudeksi saatiin noin $1320\ \text{nm}$. Toistetut mittaukset tasavirralla samoille siruille aiheuttivat kuitenkin sirujen hajoamisen. Tämän vuoksi

seuraavat mittaukset on tehty pulssitetulla virralla sirujen kuormituksen vähentämiseksi.

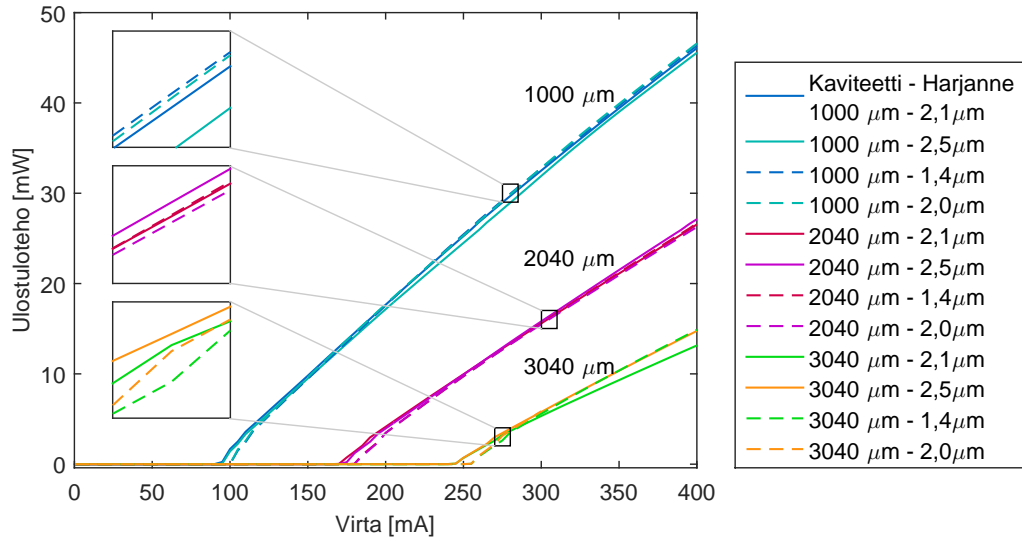
Seuraavissa mittauksissa tutkittiin U-mutkaisten sirujen toimintaa. Komponentteja prosessoitiin useilla eri mutkan kääntösäteillä. Säteet ovat 1,0 μm harjanteille 64 μm , 84 μm ja 114 μm . 1,5 μm harjanteille säteet ovat 83 μm , 103 μm ja 133 μm . Suorat harjanteiden osuudet ovat pituudeltaan 1520 μm .

U-mutkaisten komponenttien testaamisen lisäksi mitattiin molemmista näytteistä suoria RWG-komponentteja eri kaviteetin pituuksilla: 1000 μm , 2040 μm ja 3040 μm . Valitut pituudet seuraavat fotolitografi-maskin suunnittelupiirteistä. Suoria harjanteita käytettiin harjanteiden ja materiaalin toiminnan yleiseen analysointiin ja apuna mutkien toiminnan arvioinnissa.

ILV-mittaukset toteutettiin 20 °C lämpötilassa pulssitetulla virralla 1e-6 s pulssin pituudella ja 99e-6 s viiveajalla. Mittausalue oli 0-400 mA. Mittaus tehtiin kaikille siruille kahdesti. Mittauksissa ilmeistä oli, että vaikka pulssitetulla virralla sirut kestivät paremmin kuin tasavirralla, heikkeni siruista saatava teho jo toisella mittaukskerralla huomattavasti. Seuraavaksi esitettävät mittaustulokset ja niiden analyysi ovat ensimmäiseltä mittaukskerralta. Syynä tähän sirujen toiminnan merkittävään heikkenemiseen on todettu johtuvan heikosta epitaksiaalimateriaalista. Myöhemmin prosessi toistettiin toisella materiaalilla, jolloin saadut sirut toimivat myös tasavirralla hajoamatta. Muutoin saadut tulokset olivat samankaltaisia kuin tässä esitettyssä prosessissa.

Kuvassa 6.3 on esitetty suorien RWG-sirujen PI-käyrät. Kuvasta nähdään kynnysvirran ja kulmakertoimen riippuvuus sirun pituudesta. Kynnysvirta normaaliin tapaan kasvaa sirun pituuden kasvaessa. PI-käyrät on esitetty jokaiselle pituudelle ja kaikille harjanteiden leveyksille. Kuvasta nähdään, että harjanteen leveyden vaihtelu ei tuota havaittavaa eroa sirujen toiminnassa.

Tulosten tarkempaan analyysiin suorien sirujen differentiaaliset kvanttihyötysuhteet laskettiin lausekkeen (2.3) avulla. Kuvassa 6.4 on esimerkkinä Matlabilla tehty sovitte differentiaalisen kvanttihyötysuhteen käänteisluvulle kaviteetin pituuden funktiona. Saadun sovitteen avulla voidaan laskea yhtälön (2.4) avulla sirujen sisäinen kvanttihyötysuhde ja sisäiset häviöt. Kuvaajassa on mukana näkyvillä 95% luottamusrajat sovitteelle. Verrattaessa kaikkia sovitteita keskenään sovitteet vaikuttivat osuvan hyvin mittapisteisiin pisteiden vähäisestä lukumäärästä huolimatta. Tä-

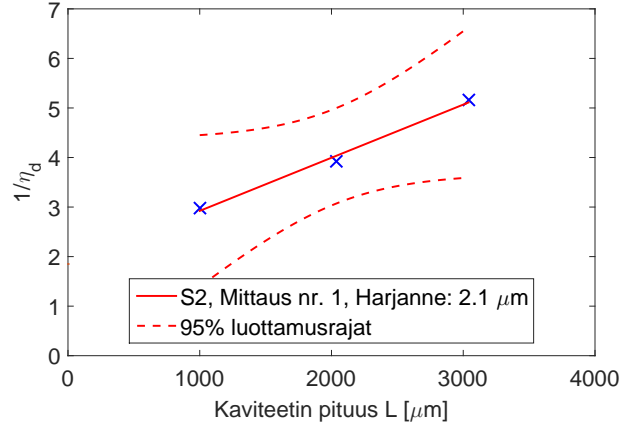


Kuva 6.3 PI-käyrät eri mittaisille suorille RWG-siruille. Käyrien kynnysvirrat ja kulmakertoimet riippuvat kaviteetin pituudesta. Muutoin harjanteen leveydestä riippumatta sirujen toiminnassa ei juurikaan ole eroja.

män perusteella arvioituna sovitteen lukuarvoihin perustuvat laskelmat vaikuttaisivat suhteellisen luotettavilta huolimatta luottamusrajojen leveydestä. Lausekkeiden (2.6) ja (2.7) avulla saadaan kaviteetin peilihäviöt ja kynnysmuotovahvistus. Lisäksi kaikille komponenteille laskettiin kynnysvirrantiheys. Saadut arvot jokaiselle harjanteen leveydelle on esitetty liitteessä 2 taulukossa 3.

Kuvassa 6.5(a) on esitetty logaritmiset sovitteet kynnysmuotovahvistuksen kynnysvirrantiheyden funktiona piirretyille arvoille. Lausekkeen (2.8) mukaan Matlabilla tehdyistä sovitteista saadaan arvot läpinäkyvyysskynnysvirrantiheydelle J_{tr} ja vahvistuskertoimelle g_0 . Saadut arvot on esitetty taulukossa 6.1. Lisäksi kuvassa 6.5(b) on esitetty kynnysvirrantiheys kaviteetin pituuden funktiona, jolloin pisteisiin tehdystä eksponentiaalisovitteesta saadaan kynnysvirrantiheys äärettömän pitkässä kaviteetissa. Myös nämä arvot on esitetty taulukossa 6.1.

Kuvassa 6.6 on esitetty U-mutkaisten komponenttien ILV-mittauksista saadut PI-käyrät. Kuvista nähdään, että näytteen 1 tapauksessa kynnysvirroissa ja suorien kulmakertoimissa on huomattavasti enemmän hajontaa kuin näytteellä 2. Lisäksi näytteen 1 1,4 μm harjanteiden kulmakertoimet näyttäisivät olevan 2,0 μm harjannetta heikompia. Näytteen 2 tapauksessa kulmakertoimissa ei juuri ole vaihtelua. Harjanne 2,1 μm vaikuttaisi keskimäärin saavuttavan hieman parempia tuloksia verrattuna



Kuva 6.4 Esimerkki sovitteesta differentiaalisen kvanttihyötysuhteen inverssistä kaviteetin pituuden funktiona näytteen 2,1 μm harjanteelle. Katkoviivoilla on merkitty sovitteelle 95% luottamusrajat. Rajat ovat varsin leveät, mutta luottamusta soviteen toimivuuteen lisää muiden vastaavien sovitteiden vastaavanlainen istuvuus.

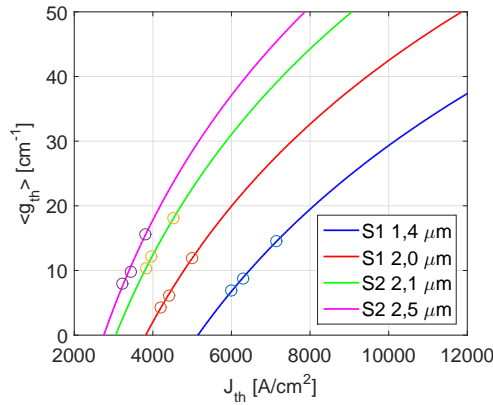
Taulukko 6.1 Suorien 1000 μm , 2040 μm ja 3040 μm RWG-sirujen mittaus- ja analyysitulokset näytteille S1 ja S2 realisoituneille harjanteen leveyksille 1,4 μm , 1,0 μm , 2,1 μm ja 2,5 μm .

Suora RWG	J_{tr} [A/cm^2]	g_0 [μm]	$J_{\text{th,inf}}$ [A/cm^2]
S1 1,4 μm	5146	44,13	5528
S1 2,0 μm	3819	44,13	3870
S2 2,1 μm	3054	45,96	3526
S2 2,5 μm	2752	47,59	3021

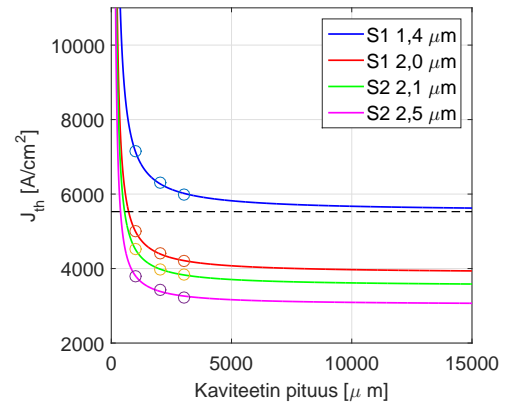
harjanteeseen 2,5 μm , mutta esiintyvän hajonnan sisällä ero ei ole merkittävä.

Saatujen kulmakertoimien ja kynnysvirran arvojen perusteella komponenteille laskettiin suorien komponenttien tapaan η_d kulmakertoimien avulla, lausekkeen (4.13) avulla arvio mutkahäviöistä, lausekkeella (4.10) kynnysmuotovahvistus, kynnysvirran arvoista kynnysvirrantiheys ja kaviteeteille peilihäviöt lausekkeella (2.6). Mutkahäviöiden laskuissa käytettiin suorille RWG:lle laskettuja sisäisten häviöiden ja sisäisen kvanttihyötysuhteen arvoja. Saaduista arvoista lasketut keskiarvot kullekin harjanteen leveydelle on esitetty liitteessä 4 taulukossa 2. Lisäksi taulukossa on esitetty kunkin komponentin kaviteetin pituus L ja mutkan minimisäde R_{min} .

Komponenttien mutkahäviöt on esitetty kuvassa 6.7. Yleisesti sovelluksissa, joissa



(a) Logaritmiset sovitteet kynnysmuotovahvistukselle kynnysvirrantiheyden funktiona suorien RWG-sirujen mittaustuloksille. Sovitteesta saadaan taulukossa 6.1 esitetyt arvot läpinäkyvyyskynnysvirrantiheydelle ja vahvistuskertoimelle.



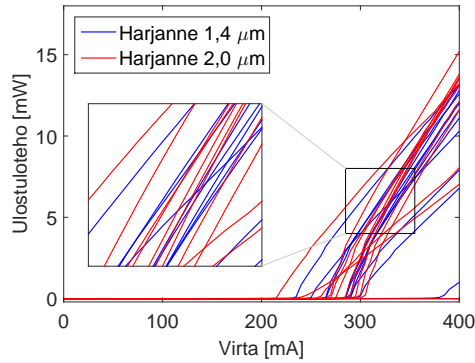
(b) Eksponentiaalinen sovitte kynnysvirrantiheydelle kaviteetin pituuden funktiona. Sovitteista saadaan taulukossa 6.1 esitetyt arvot kynnysvirrantiheydelle äärettömän pitkässä kaviteetissa. Näytteelle S1 1,4 μm on piirretty havainnollistamaan mustalla katkoviivalla virrantiheyden arvo, jota kohti sovitte konvergoituu.

Kuva 6.5 Tulosten analyysiä.

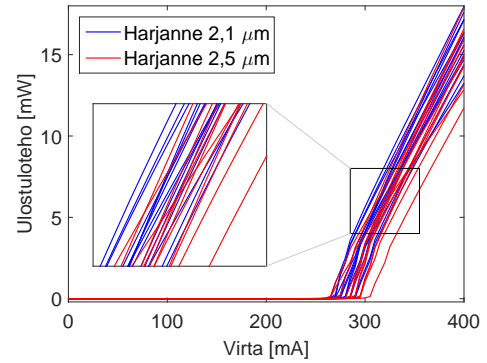
valoa ohjataan mutkalle taivutetun aaltojohteen lävitse, mutkahäviöt kasvavat taivutussäteen pienentyessä. [5, 27] Vastaava trendiä ei kuitenkaan ole havaittavissa lasketuissa mutkahäviöiden arvoissa. Mikäli kyseessä ei ole todellinen fysikaalinen ilmiö, syy häviöiden ja säteen korrelaation puutteeseen todennäköisesti viittaa laskuissa käytetyn lausekkeen 4.13 puutteellisuuteen.

Tuloksissa on havaittavissa varsin paljon hajontaa sekä saman komponenttityypin sisällä että eri harjanteiden leveyksien välillä. Kuten kuvista 6.5, 6.6(a) ja 6.7 voidaan havaita, ovat näytteen 1 1,4 μm levyisen harjanteen mittaustulokset selvästi muita heikompia. Ottaen huomioon myös 2,0 μm levyisen harjanteen saamat näytettä 2 suuremmat mutkahäviöiden arvot voidaan todeta näytteen 1 toimivan selvästi näytettä 2 heikommin.

Tarkasteltaessa mahdollisia selityksiä havaittuun eroon näytteillä, jotka on valmistettu yhtäaikaaisesti samasta materiaalista, nousee mahdolliseksi syyksi näytteiden valmistusprosessien välinen ero. Kuten edellisessä luvussa havainnoitiin, ovat näytteen 1 harjanteiden seinämät visuaalisesti havainnoituna näytteen 2 seinämiä karkeammat. Tämä ero oletettavasti johtuu näytteiden ICP-syövytyksessä käytettyjen



(a) PI-käyrät Euler-SOA -sirujen ILV-mittauksista näytteelle 1. Tuloksissa on havaittavissa varsin runsasta hajontaa ja erityisesti harjanteen leveydellä $1,4\text{ }\mu\text{m}$ suurien kulmakeroimien ovat harjannetta $2,0\text{ }\mu\text{m}$ heikompia.



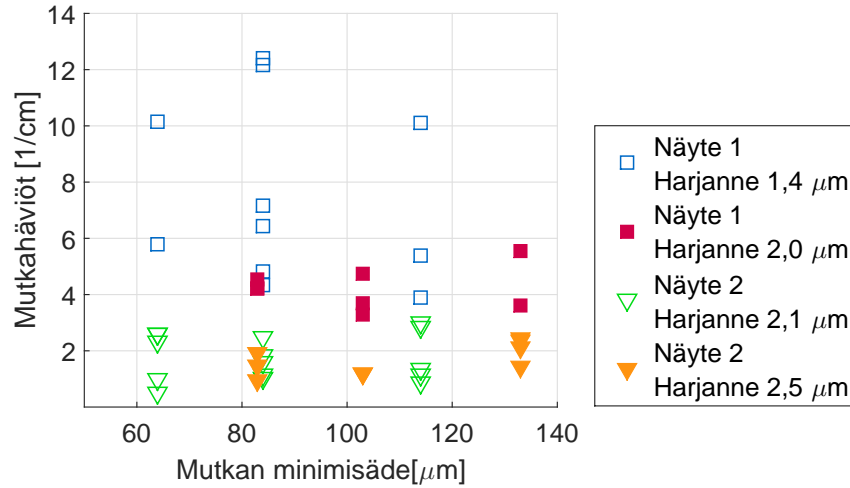
(b) PI-käyrät näytteelle 2. Tällä näytteellä hajonta on näytettä 1 pienempää ja kulmakertoimet saavat varsin samanlaisia arvoja.

Kuva 6.6 PI-käyrät Euler-SOA U-mutkaisille näytteille 1 ja 2. Kuvista nähdään näytteen 2 tuottavan parempia tehoja pienemmällä hajonnalla kuin näyte 1.

maskien erosta. Näytteelle 1 käytettiin syövytysmaskin valmistuksessa metallimas-kivälvaihetta, kun taas näytteellä 2 vastaava vaihe jätettiin pois. Näyttäisi siis siltä, että seinämän karkeuden lisääntyminen vaikuttaa merkittävästi sirontahäviöiden lisääntymiseen. Vertailemalla näytteen 1 harjanteen $2,0\text{ }\mu\text{m}$ ja näytteen 2 harjanteen $2,1\text{ }\mu\text{m}$ välisiä mutkahäviöiden arvoja nähdään, että kaikki näytteen 2 arvot ovat näytettä 1 parempia. Lisäksi huomattaessa harjanteiden olevan lähes saman levyiset voidaan varsin luotettavasti lähteä oletuksesta, että ero häviöiden synnyssä ei johdu pelkästään harjanteiden leveyksien erosta.

Tarkasteltaessa mutkahäviöiden arvoja voidaan todeta niiden olevan varsin alhaiset. Näytteellä 1 häviöt vaihtelevat noin välillä $3\text{--}13\text{ 1/cm}$ ja näytteellä 2 arvot jäävät noin välille $0,5\text{--}3\text{ 1/cm}$ ilman havaittavaa riippuvuutta mutkan säteestä. Arvot itses-sään ovat huomattavan alhaiset ja kertovat mutkien toiminnasta positiivista viestiä, vaikka tehtyjen mittausten rajallinen määrä vielä heikentääkin arvojen luotettavuut-ta.

U-mutkaisten komponenttien toiminnan analyysistä puuttuu vielä komponenttien testaaminen vahvistimena siten, että valo kulkee kaviteetin lävitse vain kerran. Tä-hän liittyen testillä pystytään varmuudella todentamaan, että valo pääsee kulkemaan mutkan lävitse eikä jää vain resonoimaan suorille osuuksille. Tässä työssä esitettyjä



Kuva 6.7 Lasketut mutkahäviöiden arvot Euler-SOA -siruille mutkan minimisäteen funktiona. Kuvassa ovat näkyvissä sekä näytteen 1 että 2 arvot. Arvoista nähdään näytteen 1 häviöiden saavan huomattavasti näytettä 2 suurempia arvoja. Näytteen 2 eri harjanteen leveyksien välillä häviöissä ei ole havaittavissa selvää eroa. Tuloksissa mutkahäviöt eivät havaittavasti vaihtelee mutkan kääntösäteiden funktiona, kuten yleensä kirjallisuudessa on havaittu [5, 27].

tuloksia seuranneet testit viittaavat kuitenkin siihen, että valo pääsee kulkemaan mutkassa mahdollisesti jopa siten, että mutkalla on valoa vahvistava luonne puh-taan häviöllisyyden sijasta. Lisäksi tällä testillä varmennetaan myös mutkahäviöiden suuruus.

7. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Tämän työn päämääränä on ollut kehittää optisten puolijohdevahvistimien hybridi-integroitavuutta VTT:n SOI-alustoille [1, 2, 9, 8, 10]. Käytännössä tämä toteutettiin kahdella eri lähestymistavalla: pilkkomistarkkuutta edistävillä katkaisumerkeillä ja valon kytkeytymistä ja tiivistä pakkausta edistävillä Euler-SOA -mutkakomponenteilla. Molemmissa kehitettävissä SOA-komponenteissa valoa ohjataan RWG-rakenteella. Katkaisumerkkisirujen tapauksessa kanava on asetettu 7° kulmaan fasetin normaaliin nähden. Euler-SOA-sirulla kanava on taivutettu U-mutkalle. Molemmat komponentit on kehitetty 1300nm GaAs/AlGaAs GaInNAsSb-kaksoiskvanttikaivomateriaaleilla. Molempien sirujen toimintaa testattiin operoimalla niitä laserdiodeina.

Katkaisumerkkien toiminta perustuu puolijohteeseen märkäsyövytettäviin merkkeihin, joiden profiilin V-muoto mahdollistaa pilkkoutumisen tarkasti halutusta kohdasta kidetasojen suuntaisesti. Merkkien avulla pilkottujen sirujen pituusvaihtelun on arvioitu olevan enimmillään ± 250 nm, joka on selkeä parannus pilkkomislaitteistolla tehtävän pilkkomisen tarkkuuteen, joka vaihtelee useasta mikrometristä noin 10 μm :iin.

Merkkien avulla pilkottujen sirujen fasettien laatu on ollut vaihtelevaa ja satunnaisesti merkkien välisille kannaksille, joista valo kytketään sisään ja ulos sirusta, syntyy siirtymiä kidetasolta toiselle. Nämä virheet fasetilla näkyvät ILV-mittaustuloksissa kasvaneena kynnysvirtana ja hyötysuhteen laskuna. Katkaisumerkillisistä siruista saatava kaukokenttä on muodoltaan lähes gaussinen.

Kokonaisuutena mittaustuloksissa ei ole havaittavissa huomattavaa heikkenemistä verrattuna perinteisesti pilkottuihin siruihin. Näin ollen tavoiteltu parempi pilkkomistarkkuus integrointia varten ollaan saavutettu ilman huomattavaa laskua sirujen tehokkuudessa. Seuraavissa testeissä tullaan kehittämään merkkien muotoa siten, että kannasten alueelle syntyviä siirroksia pystytään vähentämään ja siten parantamaan toimivien komponenttien saantoa ja hyötysuhdetta. Alustavat testit viittaavat

tämän olevan mahdollista.

Toisena komponenttityyppinä kehitettyjen U-mutkaisten SOA-sirujen mutkan muodossa käytetään Fresnel'n yhtälöistä saatavaa Eulerin spiraalia. Mutkan kääntösäde muuttuu mutkan pituuden funktiona. Mutkan muodolla pyritään vähentämään mutkassa muodon edetessä syntyviä mutkahäviöitä. Vastaavaa mutkan muotoa on hyödynnetty aikaisemmin pii-pohjaisissa sovelluksissa.

Tässä työssä keskityttiin mutkien kehitykseen GaAs-kiekoilla. Erityisinä tarkastelun kohteina olivat valon kytkeytyminen ja kulkeminen mutkassa ja näihin liitännäiset mutkahäviöt ja niiden minimoiminen. Valon ohjaamiseksi mutkan alueella kulkeva harjannetta ympäröivä allas syövytettiin koko epitaksiaalirakenteen lävitse optisen kentän parempaa ohjautuvuutta varten. Lisäksi harjanteen seinämän karkeuden vähentämiseen kiinnitettiin huomiota sironnan vähentämiseksi. Mutkan säteen vaikutusta mutkahäviöihin tutkittiin useilla eri mutkan kaartuvuussäteillä. Samoin tarkasteltiin harjanteen leveyden vaikutusta.

ILV-mittauksissa ja seuranneessa analyysissä havaittiin kahdesta prosessoidusta näytteestä toisessa heikompi suorituskky. Tähän suorituskvyn laskuun mahdollisesti vaikuttavana tekijänä liitettiin harjanteiden seinämien suurempi karheus johtuen eroista prosessointimenetelmissä.

Mutkahäviöiden analyysiä varten johdettiin suorille laserdiodeille tarkoitettu mallista yhtälö häviöiden arviointia varten. Yhtälössä käytettiin yksinkertaistavia oletuksia ja sen validiuden varmentaminen vaatii lisätarkastelua ja mahdollisesti laajempaa mittausaineistoa. Lausekkeen avulla saatujen mutkahäviöiden arvot paremmalle näytteelle sijoittuivat välille 0,5-3 1/cm. Huonommalla näytteellä hajonta oli suurempaa arvojen asettuessa välille 3-13 1/cm. Mutkan säteen pienenemisen ei havaittu kasvattavan mutkahäviöitä. Tämä korrelaation puute asettaa käytetyn häviöiden arviointimenetelmän kyseenalaiseksi ottaen huomioon yleisesti raportoidun trendin mutkahäviöiden kasvusta säteen pienentyessä [5, 27]. Merkittävää vaikutusta harjanteiden leveydellä häviöihin ei havaittu paremmalla näytteellä. Heikommin toimivalla näytteellä häviöt kasvoivat kapeammalla harjanteella.

Mutkahäviöiden arvioinnin validiteetin tarkastamisen lisäksi lisäkokeet ovat aiheellisia, sillä käytetty epitaksiaalimateriaalin kestävyys oli heikko ja on mahdollisesti vaikuttanut osaltaan tulosten luotettavuuteen. Lisätietoa komponenttien toiminnasta saadaan lisäksi tulevaisuudessa, kun siruja yritetään operoida SOA:na. Näissä

mittauksissa myös lopullisesti varmennetaan valon kulku mutkan lävitse ja mutkahäviöiden suuruus.

Lopputuloksena tässä työssä on esitelty SOA-komponenttien pituuden säätelyn parannettu hallinta märkäsyövytettyjen katkaisumerkkien avulla ja todennettu Euler-SOA-sirujen toiminta laserdiodin kapasiteetissa ja mutkahäviöiden varsin alhainen taso.

LÄHTEET

- [1] T. Aalto, M. Harjanne, M. Kapulainen, S. Ylinen, M. Guina, K. Haring, J. Puustinen, and V. Mikhlin, *GaAs-SOI integration as a path to low-cost optical interconnects*, ser. Photonics West Conference. SPIE, 2011, pp. 1–8, 10.1117/12.874644.
- [2] T. Aalto, M. Harjanne, S. Ylinen, M. Kapulainen, T. Vehmas, M. Cherchi, C. Neumeyr, M. Ortsiefer, and A. Malacarne, “Multi-wavelength transceiver integration on soi for high-performance computing system applications,” *SPIE Proceedings*, vol. 9368, 2015, doi: 10.1117/12.2079682.
- [3] T. Alexoudi, D. Fitsios, G. T. Kanellos, N. Pleros, T. Tekin, M. Cherchi, S. Yline, M. Harjanne, M. Kapulainen, and T. Aalto, “Dual-facet coupling of soa array on 4-um silicon-on-insulator implementing a hybrid integrated soa-mzi wavelength converter,” *SPIE Proceedings*, vol. 8990, 2014, doi: 10.1117/12.2037874.
- [4] A. G. Baca and C. I. H. Ashby, *Fabrication of GaAs Devices*. London, United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers, 2005.
- [5] P. Bienstman, E. Six, A. Roelens, M. Vanwolleghem, and R. Baets, “Calculation of bending losses in dielectric waveguides using eigenmode expansion and perfectly matched layers,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, no. 2, pp. 164–166, Feb 2002.
- [6] K. Bordo and H.-G. Rubahn, “Effect of deposition rate on structure and surface morphology of thin evaporated al films on dielectrics and semiconductors,” *Materials Science (Meiziagotyra)*, pp. 1392–1320, 2012, <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ms.18.4.3088>.
- [7] M. Born and E. Wolf, *Principles of optics : electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Pergamon Press, 1959.
- [8] M. Cherchi, S. Ylinen, M. Harjanne, M. Kapulainen, T. Vehmas, and T. Aalto, “Low-loss spiral waveguides with ultra-small footprint on a micron scale soi platform,” *Proc. SPIE*, vol. 8990, pp. 899 005–899 005–7, 2014, 10.1117/12.2039940. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2039940>

- [9] M. Cherchi, S. Ylinen, M. Harjanne, M. Kapulainen, and T. Aalto, “Dramatic size reduction of waveguide bends on a micron-scale silicon photonic platform,” *Optics Express*, pp. 133–154, doi: 10.1364/OE.21.017814.
- [10] M. Cherchi, S. Ylinen, M. Harjanne, M. Kapulainen, T. Vehmas, and T. Aalto, “The euler bend: paving the way for high-density integration on micron-scale semiconductor platforms,” *SPIE Proceedings*, 2014, doi: 10.1117/12.2039912.
- [11] L. A. Coldren, S. W. Corzine, and M. L. Masanovic, *Diode lasers and photonic integrated circuits*, 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.
- [12] N. K. Dutta and Q. Wang, *Semiconductor optical amplifiers*, 2nd ed. Singapore: World Scientific Publishing, 2006.
- [13] *GST Scriber/Breaker Operations Manual*, Rev g ed., Dynatex International, Inc., May 2002.
- [14] G. Giannoulis, V. M. Korpijärvi, N. Iliadis, J. Mäkelä, J. Viheriälä, D. Apostolopoulos, M. Guina, and H. Avramopoulos, “Dilute nitride soas for highspeed data processing in variable temperature conditions,” *Optical Society of America*, 2015, doi: 10.1364/OFC.2015.W2A.20.
- [15] E. Hecht, *Optics*, 4th ed. Addison-Wesley, 2002.
- [16] J. E. Heebner, T. C. Bond, and J. S. Kallman, “Generalized formulation for performance degradations due to bending and edge scattering loss in microdisk resonators,” *Opt. Express*, vol. 15, no. 8, pp. 4452–4473, Apr 2007.
- [17] K. Hinton, G. Raskutti, P. M. Farrell, R. S. Tucker, Fellow, and IEEE, “Switching energy and device size limits on digital photonic signal processing technologies,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, pp. 938–945, May/June 2008, doi: 10.1109/JSTQE.2008.916242.
- [18] S. Iida and K. Ito, “Selective etching of gallium arsenide crystals in h₂so₄-h₂o₂-h₂o system,” *J. Electrochem. Soc.*, pp. 768–771, 1971, doi: 10.1149/1.2408161.
- [19] Karhunen, Lassila, Pyy, Ranta, Räsänen, Saikkonen, and Suosara, *Lujuusoppi*. Vantaa: Otatieto, 1992.
- [20] D. Liang, J. Wang, and D. C. Hall, “High-efficiency native-oxide-passivated high-index-contrast ridge waveguide lasers,” *Electronics Letters*, vol. 42, no. 6, pp. 349–350, March 2006.

- [21] M. Lipinski, “Silicon nitride for photovoltaic application,” *Archives of Materials Science and Engineering*, pp. 69–87, 2010.
- [22] M. Lipinski, P. Zieba, S. Jonas, S. Kluska, M. Sokolowski, and H. Czternastek, “Optimisation of sinx:h layer for multicrystalline silicon solar cells,” *Opto-Electronics Review*, pp. 41–44, 2004.
- [23] D. Marcuse, “Reflection loss of laser mode from tilted end mirror,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 336–339, Feb 1989, 10.1109/50.17776.
- [24] D. S. Meek and D. J. Walton, “The use of cornu spirals in drawing planar curves of controlled curvature,” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, pp. 69–78, 1989, doi:10.1016/0377-0427(89)90076-9.
- [25] H. P. Myers, *Introductory Solid State Physics*, 2nd ed. CRC Press, 1997.
- [26] D. Rafizadeh, J. P. Zhang, R. C. Tiberio, and S. T. Ho, “Propagation loss measurements in semiconductor microcavity ring and disk resonators,” *Journal of Lightwave Technology*, pp. 1308–1314, July 1998, doi: 10.1109/50.701410.
- [27] B. M. A. Rahman, D. M. H. Leung, S. S. A. Obayya, and K. T. V. Grattan, “Numerical analysis of bent waveguides: bending loss, transmission loss, mode coupling, and polarization coupling,” *Appl. Opt.*, vol. 47, no. 16, pp. 2961–2970, Jun 2008.
- [28] Rapido, “About the project,” July 2016. [Online]. Available: <http://www.rapido-project.eu/index.html>
- [29] A. Rostami, H. Baghban, and R. Maram, *Nanostructure Semiconductor Optical Amplifiers: Building Blocks for All-Optical Processing*, 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, eBook.
- [30] T. Saitoh and T. Mukai, “Traveling-wave semiconductor laser amplifiers for optical communications systems,” in *Global Telecommunications Conference, 1990, and Exhibition. 'Communications: Connecting the Future', GLOBECOM '90., IEEE*, Dec 1990, pp. 1274–1280 vol.2, 10.1109/GLOCOM.1990.116700.
- [31] D. W. Shaw, “Localized gaas etching with acidic hydrogen peroxide solutions,” *Journal of The Electrochemical Society J. Electrochem. Soc.*, pp. 874–880, 1981, doi: 10.1149/1.2127524.

- [32] T. Skauli, P. S. Kuo, K. L. Vodopyanov, T. J. Pinguet, O. Levi, L. A. Eyres, J. S. Harris, M. M. Fejer, B. Gerard, L. Becouarn, and E. Lallier, “Improved dispersion relations for gaas and applications to nonlinear optics,” *Journal of Applied Physics*, 2013, doi: 10.1063/1.1621740.
- [33] B. G. Streetman and S. K. Banerjee, *Solid State Electronic Devices*, 6th ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2006.
- [34] O. Svelto and D. C. Hanna, *Principles of Lasers*, 5th ed. New York: Springer, 2010.
- [35] C. R. Tellier, G. Huve, and T. G. Leblois, “Anisotropic chemical etching of iii-v crystals dissolution slowness surface and application to gaas,” *Active and Passive Electronic Components*, pp. 133–154, September 2004.
- [36] J. Turner, “Apparatus for scribing and/or breaking semiconductor wafers,” Patent, Oct. 13, 1998, uS Patent 5,820,006. [Online]. Available: <http://www.google.com/patents/US5820006>
- [37] N. Yahya, W. Lim, S. Phang, H. Ahmad, R. Zakaria, and F. M. Adikan, “Curing methods yield multiple refractive index of benzocyclobutene polymer film,” *World Academy of Science, Engineering and Technology*, pp. 540–542, February 2011.
- [38] A. Yariv and P. Yeh, *Photonics: optical electronics in modern communications*, 6th ed. New York: Oxford University Press, 2007.

LIITE 1. PROSESSIVAIHEET

Taulukko 1 Katkaisumerkki SOA -prosessin vaiheet

1. RWG		4. p-metallointi	
SiO ₂ kasvatus	200 nm	HMDS höyrystys	
HMDS höyrystys		Resistin levitys	AZ5214E; 1,8 µm
Resistin levitys	AZ6612; 3,4 µm	Paisto	1 min; 100°C
Paisto	1 min; 100°C	Kuviointi valottamalla	
Kuviointi valottamalla		Kuvion kääntö -paisto	2 min; 115°C
Kehitys	AZ726MIF	Jäähdytys	10 min
Paisto	2 min; 125°C	Koko näytteen valotus	
SiO ₂ syövytys	CHF ₃ /Ar; 25/25 sccm	Kehittäminen	AZ726MIF
Resistin poisto	S1165; 80°C	Oksidin poisto	NH ₄ OH:H ₂ O 1:10; 30 s
O ₂ plasma		p-metallin höyrystys	Ti/Pt/Au 50/50/200 nm
ICP syövytys	SiCl ₄ /Ar 7,5/15 sccm		
SiO ₂ poisto	CHF ₃ /O ₂ 2/30 sccm		
2. Katkaisumerkit		5. Ohennus	
HMDS höyrystys		Ohennus	110 µm
Resistin levitys	AZ6632; 4,8 µm		
Paisto	1 min 30 s; 110°C		
Kuviointi valottamalla			
Kehitys	AZ726MIF		
Paisto	5 mins; 125°C		
ICP syövytys	BCl ₃ /Ar 5/45 sccm		
Märkäsyövytys	H ₂ SO ₄ :H ₂ O ₂ :H ₂ O 1:8:1; 2 min		
Resistin poisto	S1165; 80°C		
O ₂ -plasma			
3. Avaukset piinitridissä		6. n-metallointi	
SiNx kasvatus	160 nm	Oksidin poisto	NH ₄ OH:H ₂ O 1:10; 30 s
HMDS höyrystys		n-metallin höyrystys	Ni/Au/Ge/Au 5/5/30/90 nm
Resistin levitys	AZ6632; 3,2 µm	RTA	370°C; 60s
Paisto	2 min; 115°C	Ar käsittely RIE	2 min; 30s
Kuviointi valottamalla		n-metallin höyrystys	Ti/Pt/Au 50/50/100 nm
Kehitys	AZ726MIF		
Paisto	2 min; 125°C		
SiNx syövytys	CHF ₃ /Ar; 25/25 sccm		
Resistin poisto	S1165; 80°C		
O ₂ -plasma			
		7. Pilkkominen ja paketointi	
		Pilkkominen ja paketointi	

Taulukko 2 Euler SOA -prosessin vaiheet

Metallimaski			
1.1 RWG 1. vaihe, menetelmä 1		3. Avaukset piinitridissä	
SiO ₂ kasvatus	500 nm	SiNx kasvatus	300 nm
HMDS höyrytys		HMDS höyrytys	
Resistin levitys	AZ5214E; 1,6 µm	Resistin levitys	AZ6632; 3,2 µm
Paisto	1 min; 100°C	Paisto	2 min; 115°C
Kuviointi valottamalla		Kuviointi valottamalla	
Kuvion kääntö -paisto	2 min; 115°C	Kehitys	AZ726MIF
Jäähdytys	10 min	Paisto	2 min; 125°C
Koko näytteen valotus		SiNx syövytys RIE	CHF ₃ /Ar 25/25 sccm
Kehitys	AZ726MIF	Resistin poisto	S1165; 80°C
Al höyrytys	100 nm; 1 nm/s	O ₂ plasma	
Lift off	asetoni, asetoni, metanoli		
SiO ₂ syövytys	CHF ₃ /Ar 2/30 sccm	4. p-metalointi	
Al poisto	AZ351:H ₂ O 1:1	HMDS höyrytys	
ICP syövytys	BCl ₃ /SiCl ₄ /Ar 1/8/16 sccm	Resistin levitys	AZ5214E; 1,8 µm
TAI		Paisto	1 min; 100°C
Ilman metallimaskia		Kuviointi valottamalla	
1.2 RWG 1. vaihe, menetelmä 2		Kuvion kääntö -paisto	2 min; 115°C
SiO ₂ kasvatus	300 nm	Jäähdytys	10 min
HMDS höyrytys		Koko näytteen valotus	
Resistin levitys	AZ6612; 1,8 µm	Kehittäminen	AZ726MIF
Paisto	1 min; 100°C	Oksidin poisto	NH ₄ OH:H ₂ O 1:10; 30 s
Kuviointi valottamalla		p-metallin höyrytys	Ti/Pt/Au 50/50/200 nm
Kehitys	AZ726MIF	5. Ohennus	
Paisto	2 min; 125°C	Ohennus	110 µm
SiO ₂ syövytys	CHF ₃ /Ar; 25/25 sccm	6. n-metalointi	
Resistin poisto	S1165	Oksidin poisto	NH ₄ OH:H ₂ O 1:10; 30 s
(O ₂ plasma)		n-metallin höyrytys	Ni/Au/Ge/Au 5/5/30/90 nm
2. RWG 2. vaihe		RTA	370°C; 60s
HMDS höyrytys		Ar käsittely RIE	2 min; 30s
Resistin levitys	AZ6632; 2,8 µm	n-metallin höyrytys	Ti/Pt/Au 50/50/100 nm
Paisto	1 min; 110°C	7. Pilkkominen ja paketointi	
Kuviointi valottamalla		Pilkkominen ja paketointi	
Kehitys	AZ726MIF		
Paisto	2 min; 125°C		
ICP syövytys	BCl ₃ /SiCl ₄ /Ar 1/8/16 sccm		
Resistin poisto	S1165; 80°C		
O ₂ plasma			
SiO ₂ poisto	CH ₃ /O ₂ 2/30 sccm		

LIITE 2. TULOSTAULUKOT

Taulukko 3 Suorien 1000 μm , 2040 μm ja 3040 μm RWG-sirujen mittaus- ja analyysitulokset näytteille S1 ja S2 realisoituneille harjanteen leveyksille 1,4 μm , 2,0 μm , 2,1 μm ja 2,5 μm .

L [μm]	I _{th} [mA]	dP/dI [W/A]	J _{th} [A/cm ²]	η_d	η_i	α_m [cm ⁻¹]	α_i [cm ⁻¹]	< g _{th} > [cm ⁻¹]
S1	1,4 μm							
1000	100	0,3304	7143	0,3517	0,4393	11,41	3,123	14,54
2040	180	0,2565	6303	0,2731	0,4393	5,60	3,123	8,72
3040	255	0,2285	5992	0,2432	0,4393	3,75	3,123	6,88
S1	2,0 μm							
1000	100	0,3286	5000	0,3498	0,3422	11,41	0,544	11,96
2040	180	0,2594	4412	0,2762	0,3422	5,60	0,544	6,14
3040	255	0,2996	4194	0,3190	0,3422	3,75	0,544	4,30
S2	2,1 μm							
1000	95	0,3157	4524	0,3361	0,5404	11,41	6,616	18,03
2040	170	0,2389	3968	0,2544	0,5404	5,60	6,616	12,21
3040	245	0,1818	3838	0,1936	0,5404	3,75	6,616	10,37
S2	2,5 μm							
1000	95	0,3091	3800	0,3291	0,4533	11,41	4,213	15,63
2040	175	0,2452	3431	0,2611	0,4533	5,60	4,213	9,81
3040	245	0,1998	3224	0,2127	0,4533	3,75	4,213	7,97

Taulukko 4 U-mutkaisten 64 μm , 84 μm , 114 μm , 83 μm , 103 μm ja 133 μm minimisäteisten Euler-sirujen mittaus- ja analyysitulokset näytteille S1 ja S2 realisoituneille harjanteen leveyksille 1,4 μm , 1,0 μm , 2,1 μm ja 2,5 μm .

$\mathbf{R_{min}}$ [μm]	\mathbf{L} [μm]	$\mathbf{I_{th}}$ [mA]	$\mathbf{dP/dI}$ [W/A]	$\mathbf{J_{th}}$ [A/cm ²]	η_d	α_m [cm ⁻¹]	α_b [cm ⁻¹]	$\langle \mathbf{g_{th}} \rangle$ [cm ⁻¹]
S1	1,4 μm							
64	3440	263	0,1003	5451	0,1068	3,318	7,508	13,95
84	3594	275	0,1001	5465	0,1066	3,176	7,423	13,72
114	3796	288	0,1056	5426	0,1124	3,007	6,083	12,21
S1	2,0 μm							
83	3559	282	0,1319	3957	0,1404	3,407	4,318	8,30
103	3685	290	0,1370	3935	0,1458	3,291	3,899	7,77
133	3874	288	0,1229	3711	0,1308	3,130	4,592	8,30
S2	2,1 μm							
64	3440	275	0,1456	3807	0,1550	3,525	1,803	12,36
84	3594	277	0,1428	3670	0,1520	3,374	1,613	12,02
114	3796	282	0,1351	3538	0,1438	3,195	1,848	12,07
S2	2,5 μm							
83	3559	283	0,1558	3184	0,1659	3,207	1,361	8,78
103	3685	293	0,1566	3175	0,1667	3,098	1,112	8,42
133	3874	295	0,1377	3046	0,1466	2,946	1,967	9,13